

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA CIVIL

“OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA”.

Trabajo de titulación
previo a la obtención del
título de Ingeniera
Ambiental e Ingeniero
Civil

Autores:

Fernando Xavier Andrade Loor CI: 0301921904

María del Carmen Peña Muñoz CI: 0105777221

Director:

Ing. Andrés Omar Alvarado Martínez Ph.D. CI: 0101246477

Cuenca-Ecuador

Marzo-2017



RESUMEN

Las lagunas aireadas de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Ucubamba, Cuenca, ha sido desde su inicio un reto importante para ETAPA en vista de los ingentes recursos energéticos que conlleva el funcionamiento de los 22 aireadores instalados en cada laguna. El presente proyecto de investigación analiza el gasto energético de estos escenarios operativos y estudia la distribución del oxígeno disuelto (OD) aportado por los aireadores en la laguna mediante campañas experimentales con el fin de plantear posibles escenarios de operación que optimicen el consumo energético sin afectar los procesos. Para ello, se recopiló y analizó el comportamiento histórico de concentraciones y cargas de DBO, DQO, y sólidos y las curvas de oxígeno disuelto en comparación con la potencia de aireación inyectada en la laguna. Las campañas experimentales recopilaron información de la distribución de OD en la laguna, construyéndose mapas de distribución de OD que permitieron analizar la distribución del mismo a lo largo de la laguna aireada ante diferentes escenarios operacionales. Posteriormente se realizó un análisis del gasto energético, económico, capacidad de aireación y patrones de flujo de cada uno de los escenarios planteados junto con un análisis de estudios previos realizados en la laguna. Los resultados muestran una gran influencia del patrón hidráulico en la distribución del OD y propone un posible escenario de operación que proporcione condiciones más estables para mantener una biomasa saludable en la laguna y ocasione también una optimización energética y económica a la Jefatura de la PTAR de Ucubamba.

Palabras clave: aireadores mecánicos, laguna aireada, oxígeno disuelto, escenario de operación, consumo energético.



ABSTRACT

The aerated lagoons in Cuenca's Ucubamba Wastewater Treatment Plant (WWTP), has been an important challenge to ETAPA EP since its beginnings because of the huge energetic resources attached to the operation of the 22 aerators installed in each lagoon. This research project analyzes in depth the energetic cost of these settings and studies and the distribution of dissolved oxygen (DO) contributed by the aerators in the lagoon through experimental campaigns, in order to raise possible operation settings to optimize the energetic cost without affecting the WWTP's. To achieve this, we gathered and analyzed the historical behavior of concentrations and loads of BOD, COD, solids, and dissolved oxygen curves compared with injected aeration power in the lagoon. The experimental campaigns gathered DO distribution information in the lagoon, building DO distribution maps that allow to analyze the distribution of this parameter along the aerated lagoon through different operation settings. Later, an analysis of the energy and economic expenditure, aeration capacity and flow patterns of each one of the settings was carried out together with an analysis of previous studies carried out in the lagoon. The results show a great influence of the hydraulic pattern on the DO distribution, and propose an operation scenario that provide more stable conditions to maintain a healthy biomass in the lagoon and also cause an energy and economic optimization to the headquarters of Ucubamba's WWTP.

Keywords: mechanic aerators, aerated lagoon, dissolved oxygen, operation setting, energetic expenditure.



CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 ANTECEDENTES.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3 HIPÓTESIS	15
1.4 ESTRUCTURA DE TESIS	15
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1 SANEAMIENTO AMBIENTAL.....	15
2.1.1 AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO.....	16
2.1.2 ENFERMEDADES RELACIONADAS CON EXCRETAS.....	18
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES, PROCESOS BIOLÓGICOS Y TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO.....	20
2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	21
2.2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	24
2.2.3 TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	25
2.3 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	29
2.3.1 FUNCIONAMIENTO.....	29
2.3.2 LAGUNAS ANAEROBIAS.....	30
2.3.3 LAGUNAS AIREADAS	31
2.3.4 LAGUNAS FACULTATIVAS.....	33
2.3.5 LAGUNAS DE MADURACIÓN	35
2.4 LAGUNAS AIREADAS FACULTATIVAS.....	36
2.4.1 GENERALIDADES.....	36
2.4.2 PROCESOS BIOLÓGICOS	36
2.4.3 ASPECTOS BIOQUÍMICOS DE LAS LAGUNAS AIREADAS FACULTATIVAS.....	37
2.4.4 REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO Y ENERGÍA.....	38
2.4.5 ACUMULACIÓN DE LODOS Y DEMANDA BÉNTICA.....	39
2.4.6 HIDRÁULICA DE LAGUNA	42
2.4.7 PROBLEMAS OPERACIONALES	45
2.5 AIREADORES MECÁNICOS	45
2.5.1 TIPOS DE AIREADORES.....	45
2.5.2 TRANSFERENCIA DE OXÍGENO.....	47
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	48
3.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA.....	48
3.1.1 UBICACIÓN.....	49
3.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	50
3.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	51
3.1.4 OPERACIÓN DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE UCUBAMBA	53
3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HISTÓRICA RECOLECTA EN LAS LAGUNAS AIREADAS.....	53



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

3.2.1	PARÁMETROS DE CALIDAD	53
3.2.2	OXÍGENO DISUELTO.....	54
3.3	PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE EXPERIMENTACIÓN	54
3.3.1	ESTRUCTURA DE LA LAGUNA AIREADA.....	54
3.3.2	ESCENARIOS EXPERIMENTALES	55
3.4	RECOLECCIÓN DE DATOS EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS EXPERIMENTALES	58
3.4.1	MEDICIÓN DE OXÍGENO DISUELTO IN SITU.....	58
3.4.1.1	MULTIPARÁMETRO	60
3.5	ERROR DE MEDICIÓN	61
3.6	ELABORACIÓN DE MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO.....	62
3.7	CONSUMO ENERGÉTICO, GASTO ECONÓMICO Y CAPACIDAD DE AIREACIÓN	63
3.8	REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO Y ENERGÍA	64
3.9	ANÁLISIS DE PATRONES DE FLUJO EN LA LAGUNA CON TRAZADORES FLOTANTES.....	64
3.10	ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA BÉNTICA.....	65
CAPÍTULO 4:	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	66
4.1	ANÁLISIS DE CARGAS ORGÁNICAS Y DE SÓLIDOS EN EL AFLUENTE DE LA PTAR	66
4.2	ANÁLISIS HISTÓRICO DE PARÁMETROS DE CALIDAD	67
4.3	ANÁLISIS HISTÓRICO DEL OXÍGENO DISUELTO	73
4.4	ERROR DE MEDICIÓN	75
4.5	ANÁLISIS DE LOS MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO.....	76
4.6	CONSUMO ENERGÉTICO Y COSTO DE CONSUMO ELÉCTRICO	88
4.7	REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO Y ENERGÍA	89
4.8	ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE FLUJO OBSERVADOS.....	91
4.9	DEMANDA BÉNTICA	92
4.10	PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO PARA LA OPERACIÓN DE LA LAGUNA AIREADA.....	93
CAPÍTULO 5:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	93
5.1	CONCLUSIONES.....	93
5.2	RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS	95	
ANEXOS	97	
ANEXO #1:	VALORES PARA EL CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO	97
ANEXO #2:	TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LA PTAR DE UCUBAMBA	98
ANEXO #3:	CARGAS ORGÁNICAS Y DE SÓLIDOS	100
ANEXO #4:	CONCENTRACIONES EN LA LAGUNA AIREADA	100
ANEXO #5:	COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO.....	102
ANEXO #6:	MEDICIÓN IN SITU DE OXÍGENO DISUELTO.....	104
ANEXO #7:	TRAZADORES FLOTANTES.....	106
ANEXO #8:	ERROR DE MEDICIÓN.....	107
ANEXO #9:	DEMANDA BÉNTICA EN LA LAGUNA AIREADA.....	111



TABLAS

Tabla 2.1-1. Tecnologías mejoradas y no mejoradas para el abastecimiento de agua y saneamiento. Fuente: adaptado de OMS & Unicef (2015).	17
Tabla 2.1-2. Enfermedades encontradas en aguas residuales. Fuente: adaptado de Mara (2013); Rengel (2000).	19
Tabla 2.2-1. Características físicas de las aguas residuales. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	21
Tabla 2.2-2. Sólidos totales presentes en las aguas residuales. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	21
Tabla 2.2-3. Materia orgánica. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	22
Tabla 2.2-4. Nitrógeno total. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	22
Tabla 2.2-5. Fósforo total. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	22
Tabla 2.2-6. Materia inorgánica. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	23
Tabla 2.2-7. Gases. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	23
Tabla 2.2-8. Características biológicas de las aguas residuales. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).	23
Tabla 2.2-9. Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Fuente: adaptado de Cerezo (2011); Noyola et al. (2013).	26
Tabla 2.3-1. Ventajas y desventajas de las lagunas aireadas.	31
Tabla 2.3-2. Ciclo de respiración y fotosíntesis. Fuente: adaptado de Sperling (2007).	34
Tabla 2.3-3. Parámetros que influyen en la laguna facultativa. Fuente: adaptado de Correa (2008).	34
Tabla 2.4-1. Acumulación de lodos en lagunas de estabilización de Ucubamba. Fuente: adaptado de Durazno (2009).	41
Tabla 2.4-2. Volumen de lodo ocupado en cuatro lagunas de estabilización en México. Fuente: adaptado de Nelson et al. (2004).	43
Tabla 2.4-3. Valores de TRH recomendados para lagunas aireadas. Fuente: adaptado de (Sperling, 2007).	43
Tabla 2.4-4. Degradación de una sustancia en un reactor de mezcla completa. Fuente: adaptado de Sperling (2007).	44
Tabla 2.4-5. Principales problemas operacionales en las lagunas aireadas, causas y medidas de prevención y control. Fuente: adaptado de Sperling (2007).	45
Tabla 3.1-1. Características de las lagunas de estabilización de Ucubamba Fuente: adaptado de Cedillo & Matailo (2011).	51
Tabla 3.1-2. Parámetros de calidad del afluente. Fuente: adoptado de ETAPA (2015).	51
Tabla 3.1-3. Parámetros de calidad del efluente. Fuente: adoptado de ETAPA (2015).	52
Tabla 3.3-1. Escenario experimental 1.	55
Tabla 3.3-2. Escenario experimental 2.	56
Tabla 3.3-3. Escenario experimental 3.	57
Tabla 3.3-4. Escenario experimental 4.	58
Tabla 3.4-1. Especificaciones sensor IDS para OD (akralab, 2012).	60
Tabla 3.5-1. Disoluciones estándar de Na_2SO_3 y agua destilada.	62
Tabla 4.2-1. Remoción en porcentaje de DBO_5 en la laguna aireada.	72
Tabla 4.3-1. Análisis horario del OD.	73
Tabla 4.4-1. Resultados de calibración del Multiparámetro WTW 3420.	75
Tabla 4.4-2. Concentración de OD en las disoluciones.	76
Tabla 4.5-1. Mediciones de OD en el desarenador.	77
Tabla 4.5-2. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 1. Error de medición: ± 0.13 mg/l.	77
Tabla 4.5-3. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 2. Error de medición: ± 0.13 mg/l.	79
Tabla 4.5-4. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 3. Error de medición: ± 0.13 mg/l.	81
Tabla 4.5-5. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 4. Error de medición: ± 0.13 mg/l.	83
Tabla 4.6-1. Características de los equipos de aireación (ETAPA & TYPSA, 2004).	88
Tabla 4.6-2. Tarifas del costo del consumo eléctrico.	88
Tabla 4.6-3. Cuadro resumen de consumo energético y gasto económico de los escenarios 1, 2, 3 y 4 (considerando laguna aireada #1).	88
Tabla 4.6-4. Costo eléctrico mensual de las lagunas aireadas bajo diferentes escenarios.	89
Tabla 4.7-1. Requerimiento de oxígeno (RO) en la laguna aireada.	90
Tabla 4.7-2. Requerimiento de energía (RE) de la laguna aireada.	90
Tabla 4.7-3. Eficiencia de los escenarios en términos de energía y oxígeno suministrado.	90
Tabla 4.8-1. Cuadro resumen de trazadores flotantes en los cuatro escenarios.	91
Tabla A1-1. Presión barométrica según la altitud. Fuente: adaptado de ETAPA & TYPSA (2004).	97
Tabla A1-2. Saturación de OD en el agua expuesta al aire saturado de unidad, con 20.9 % de oxígeno y presión de 760 mm Fuente: adaptado de ETAPA & TYPSA (2004).	97
Tabla A3-1. Cargas en kg/día que ingresan a la PTAR.	100



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

Tabla A4-1. Concentraciones en mg/l de la laguna aireada en el año 2013.	100
Tabla A4-2. Concentraciones en mg/l de la laguna aireada en el año 2014.	101
Tabla A4-3. Concentraciones en mg/l de la laguna aireada en el año 2015.	101
Tabla A5-1. Comportamiento del OD en la laguna.	104
Tabla A8-1. Tiempo de reacción del sulfito de sodio y el agua destilada.	109
Tabla A9-1. Valores de SOD en laguna aireada #1.	111
Tabla A9-2. Parámetros de la SOD.	111

FIGURAS

Figura 2.1-1. Uso de saneamiento mejorado a nivel mundial. Fuente: adaptado de OMS & Unicef (2015).	17
Figura 2.1-2. Cobertura de alcantarillado en la provincia del Azuay. Fuente: adaptado de SENPLADES (2014).	18
Figura 2.2-1. Degradación aerobia y anaerobia de la materia orgánica. Fuente: adaptado de Universidad Autónoma de Chihuahua (2008).	25
Figura 2.2-2. a) Digestor convencional; b) Filtros anaerobios; c) Digestor anaerobio de alta tasa; d) Digestor de contacto anaerobio. Fuente: autores.	27
Figura 2.2-3. Reactor UASB. Fuente: autores.	28
Figura 2.2-4. Lodos activados. Fuente: autores.	28
Figura 2.2-5. Filtro percolador. Fuente: autores.	28
Figura 2.2-6. a) Filtro aerobio sumergido; b) Discos biológicos rotatorios. Fuente: autores.	29
Figura 2.3-1. Esquema general de una PTAR mediante lagunaje. Fuente: adaptado de Sperling (2007).	30
Figura 2.3-2. Laguna anaerobia. Fuente: autores.	31
Figura 2.3-3. Laguna aireada aerobia de mezcla completa. Fuente: autores.	32
Figura 2.3-4. Laguna aireada facultativa. Fuente: autores.	32
Figura 2.3-5. Laguna facultativa. Fuente: autores.	33
Figura 2.4-1. Esquema de un aireador mecánico de eje inclinado. Fuente: adaptado de Alvarado et al. (2011).	38
Figura 2.4-2. Acumulación de lodos en la laguna aireada #1. Fuente: adaptado de Durazno (2009).	41
Figura 2.5-1. Aireación mediante turbina. Fuente: autores.	46
Figura 2.5-2. a) Aireador mecánico superficial fijo; b) Aireador mecánico superficial flotante. Fuente: autores.	46
Figura 2.5-3. Aireador tipo cañón. Fuente: autores.	47
Figura 3.1-1. a) Sistema de lagunaje en la PTAR de Ucubamba; b) Tratamiento preliminar en la PTAR. Fuente: autores.	49
Figura 3.1-2. Ubicación de la PTAR de Ucubamba en la ciudad de Cuenca. Fuente: autores.	50
Figura 3.3-1. Disposición y códigos de los aireadores en laguna aireada #1, indicando la dirección de flujo. Fuente: autores.	55
Figura 3.3-2. Disposición aireadores del Escenario 1: a) Intervalo horario 1; b) Intervalo horario 2; c) Intervalo horario 3. Fuente: autores.	56
Figura 3.3-3. Disposición aireadores del Escenario 2. Fuente: autores.	57
Figura 3.3-4. Disposición aireadores del Escenario 3. Fuente: autores.	57
Figura 3.3-5. Disposición aireadores del Escenario 4. Fuente: autores.	58
Figura 3.4-1. Distribución de puntos con el orden y sentido de las mediciones de OD. Fuente: autores.	59
Figura 3.4-2. Multiparámetro WTW 3420.	60
Figura 4.1-1. Cargas de DBO y DQO del afluente que ingresa a la PTAR.	66
Figura 4.1-2. Cargas de ST, SS y SSV del afluente que ingresa a la PTAR.	67
Figura 4.2-1. DBO ₅ en afluente.	68
Figura 4.2-2. DQO en afluente.	68
Figura 4.2-3. SS en afluente.	69
Figura 4.2-4. SSV en afluente.	69
Figura 4.2-5. DBO ₅ en efluente.	70
Figura 4.2-6. DQO en efluente.	70
Figura 4.2-7. SS en efluente.	71
Figura 4.2-8. SSV en efluente.	71
Figura 4.3-1. Oxígeno disuelto versus potencia total de aireación (1, 2 y 3 de enero).	73
Figura 4.4-1. Tiempo de reacción de la disolución Na ₂ SO ₃ y agua destilada.	75
Figura 4.4-2. Curva de calibración.	76
Figura 4.5-1. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 1 a 0.25 m de profundidad.	78
Figura 4.5-2. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 1 a 1.00 m de profundidad.	79
Figura 4.5-3. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 2 a 0.25 m de profundidad.	80
Figura 4.5-4. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 2 a 1.00 m de profundidad.	81
Figura 4.5-5. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 3 a 0.25 m de profundidad.	82
Figura 4.5-6. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 3 a 1.00 m de profundidad.	83
Figura 4.5-7. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 4 a 0.25 m de profundidad.	84



Figura 4.5-8. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 4 a 1.00 m de profundidad.	85
Figura 4.5-9. Distribución de OD en los 4 escenarios.	87
Figura 4.8-1. Resultados de los trazadores flotantes en la laguna de los cuatro escenarios.	91
Figura 4.9-1. SOD de la laguna aireada #1.	92
Figura A2-1. a) Cajón de llegada; b) By-pass; c) Pantalla disipadora. Fuente: autores.	98
Figura A2-2. a) Cribas autolimpiantes; b) Rejilla. Fuente: autores.	98
Figura A2-3. a) Disipadores de energía en desarenador; b) Desarenador con brazo raspador circular. Fuente: autores.	99
Figura A2-4. a) Tornillo sin fin; b) Canal de derivación; c) Arena cubierta con cal. Fuente: autores.	99
Figura A5-1. Oxígeno disuelto versus potencia total de aireación (6, 7 y 8 de enero de 2016).	102
Figura A5-2. Oxígeno disuelto versus potencia total de aireación (26 y 27 de enero de 2016).	103
Figura A6-1. Mediciones in situ de OD.	104
Figura A6-2. Equipo de trabajo.	105
Figura A6-3. a) Concentración de OD; b) Bote de trabajo.	105
Figura A6-4. Medición de OD en el desarenador.	105
Figura A6-5. Medición de OD en la laguna aireada #1.	106
Figura A7-1. Lanzamiento de naranjas en el canal de derivación.	106
Figura A7-2. a) Recorrido preferencial de las naranjas; b y c) Zonas muertas de la laguna aireada #1.	106
Figura A7-3. Visualización de los trazadores flotantes.	107
Figura A8-1. a) Balón volumétrico, matraz de Erlenmeyer, varilla de vidrio; b) Sulfito de sodio; c) Balanza analítica.	107
Figura A8-2. a) Humedecimiento de esponja para calibración; b) Sonda IDS en el recipiente de control.	108
Figura A8-3. Llenado del agua destilada en el balón volumétrico; b) Traslado del agua al matraz de Erlenmeyer.	108
Figura A8-4. a) Ingreso del sulfito de sodio; b) Preparación de la disolución; c) Reposo de la disolución; d) Medición de OD.	109

ECUACIONES

Ecuación 2.4-1 Requerimiento de oxígeno en lagunas aireadas. Fuente: adaptado de Sperling (2007).....	38
Ecuación 2.4-2 Requerimiento energético en lagunas aireadas. Fuente: adaptado de Sperling (2007).....	39
Ecuación 2.4-3 Acumulación de lodos en lagunas. Fuente: adaptado de Oakley (2005)	40
Ecuación 2.4-4 Demanda béntica. Fuente: adaptado de Chapra (2008).....	42
Ecuación 2.4-5 Flujo descendente del carbono orgánico expresado como equivalentes de oxígeno. Fuente: adaptado de Chapra (2008).....	42
Ecuación 2.4-6 Balance de masas. Fuente: adaptado de Sperling (2007).....	44
Ecuación 2.5-1 Transferencia de oxígeno en el campo. Fuente: adaptado de ETAPA & TYPSA (2004)	47
Ecuación 2.5-2 Factor de corrección de transferencia de oxígeno. Fuente: adaptado de ETAPA & TYPSA (2004).....	47
Ecuación 2.5-3 Factor de corrección de salinidad-tensión superficial. Fuente: adaptado de ETAPA & TYPSA (2004).....	48
Ecuación 2.5-4 Factor de corrección de salinidad-tensión superficial. Fuente: adaptado de ETAPA & TYPSA (2004).....	48
Ecuación 3.2-1 Carga de un constituyente	53
Ecuación 3.2-2 Eficiencia de remoción de un constituyente	54
Ecuación 3.7-1 Potencia instalada.....	63
Ecuación 3.7-2 Densidad de energía	63
Ecuación 3.7-3 Consumo eléctrico.....	63
Ecuación 3.7-4 Capacidad de aireación.....	64
Ecuación 3.7-5 Costo consumo eléctrico	64
Ecuación 3.9-1 Velocidad superficial del flujo	65
Ecuación 3.10-1 Método modificado de la secante para el cálculo de la SOD. Fuente: adaptado de Chapra (2008)	65
Ecuación 3.10-2 SOD máxima. Fuente: adaptado de Chapra (2008)	66

**CLÁUSULAS DE DERECHO DE AUTOR**Universidad de Cuenca
Cláusula de derecho de autor

Fernando Xavier Andrade Loor, autor del Trabajo de Titulación: **"OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA"**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Mayo del 2017

Fernando Xavier Andrade Loor

C.I. 0301921904



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA



Universidad de Cuenca
Cláusula de derecho de autor

María del Carmen Peña Muñoz, autora del Trabajo de Titulación: **“OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA”**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi Título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, Mayo del 2017

María del Carmen Peña Muñoz

C.I. 0105777221



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

Fernando Xavier Andrade Loor, autor del Trabajo de Titulación:
**"OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA"**; certifico que
todas las ideas, criterios, comentarios y contenidos expuestos en la presente
investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Mayo del 2017

Fernando Xavier Andrade Loor

C.I. 0301921904



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA



Universidad de Cuenca
Cláusula de propiedad intelectual

María del Carmen Peña Muñoz, autora del Trabajo de Titulación:
**“OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA”**; certifico que
todas las ideas, criterios, comentarios y contenidos expuestos en la presente
investigación son de mi exclusiva responsabilidad.

Cuenca, Mayo del 2017

María del Carmen Peña Muñoz

C.I. 0105777221

***DEDICATORIA***

Este trabajo es dedicado principalmente a mi familia, mis padres Julio y Venus por su paciencia y comprensión; a mis hermanas Alexandra y Ana por su apoyo incondicional. Todos ellos han sido un ejemplo a seguir, influyendo en mi formación académica y como persona, estando siempre presentes en los buenos y malos momentos de este largo recorrido.

Fernando.

Dedico este trabajo a mis padres, Francisco y Ximena; a mi hermana, Erika, quienes han sido el pilar fundamental en todo lo que soy, por su apoyo incondicional y sobre todo por su ejemplo de perseverancia y constancia a lo largo de mi trayecto académico.

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

María del Carmen.

**AGRADECIMIENTOS**

El éxito de este proyecto de investigación ha sido alcanzado con la contribución esencial de ETAPA. Nuestro agradecimiento al personal de la Empresa Municipal, especialmente al Ing. Luis Felipe Díaz, Ing. Josué Larriva y al Ing. Paul Torres. De la misma forma, nuestra más sincera gratitud al Sr. Christian Galárraga, quien cooperó vigorosamente en el trabajo de campo.

Nuestro más profundo agradecimiento a nuestro director de trabajo de titulación, el Ing. Andrés Alvarado Martínez Ph.D por su valiosa orientación durante todo el estudio. Así también, por sus conocimientos, persistencia, paciencia y motivación que han sido fundamentales para alcanzar este objetivo.

Por último, agradecemos a nuestros profesores quienes nos han guiado durante toda la carrera, y que sin sus conocimientos impartidos, los títulos que obtendremos no serían posibles.

Fernando y María del Carmen.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.

En el año de 1999 se inició la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba en Cuenca, Ecuador, la misma está constituida de una estructura de tratamiento preliminar seguida de un tratamiento biológico que consta de tres fases: lagunas aireadas, lagunas facultativas y lagunas de maduración. En dicho año, se implementaron equipos de aireación en cada laguna aireada (10 en ese entonces de 75 HP de potencia); sin embargo, en el año 2013 ETAPA realizó trabajos de mantenimiento y mejoramiento integral de la PTAR. Dentro de este mejoramiento se decidió aumentar significativamente la capacidad instalada de aireadores mecánicos en las lagunas aireadas, añadiendo 12 aireadores mecánicos de flujo inclinado de 25 HP en cada laguna, resultando en 22 aireadores instalados en cada laguna en la actualidad. Por lo tanto es importante conocer si el oxígeno extra que está siendo suministrado a las lagunas aireadas, está siendo distribuido adecuadamente en las mismas y por ende utilizado para el tratamiento de las aguas residuales. El funcionamiento de los aireadores representa un gasto energético muy importante que finalmente es traducido en un costo para la Empresa Municipal, por lo que es urgente conocer cuál es el efecto real del suministro mecánico de oxígeno en el tratamiento que se desarrolla en las lagunas aireadas.

La presente investigación pretende dar el primer paso en el estudio de la efectividad de los aireadores sin afectar el rendimiento de las lagunas aireadas con el fin de plantear escenarios futuros que optimicen el gasto energético, permitiendo un uso eficiente de la energía y por ende de los recursos económicos en la operación de la PTAR. Para lograr aquello, es necesario inicialmente realizar una exhaustiva revisión de la información histórica recopilada en forma rutinaria por ETAPA desde la incorporación de los nuevos aireadores para explorar las relaciones existentes entre la distribución de las concentraciones de oxígeno disuelto versus la potencia energética suministrada por los aireadores mecánicos en el escenario actual de operación, que involucra el encendido y apagado horario de un cierto número de aireadores.

El desarrollo del proyecto permitirá proponer mediante un análisis de la distribución del oxígeno disuelto en la laguna, un escenario de operación de los aireadores que se encuentran en las lagunas aireadas con el fin de optimizar energía y que el tratamiento que se lleva a cabo no sea afectado.

Estudios anteriores realizados por Alvarado et al. (2011), los cuales estaban basados en perfiles de velocidad y curvas de distribución del tiempo de residencia cuando las lagunas disponían de 10 aireadores de 75 HP, demostraron que con 6 u 8 aireadores se tenía un comportamiento hidráulico similar al escenario con 10 aireadores, minimizando el gasto económico sin afectar el tipo de mezcla parcial que poseen las lagunas; lo que invita a pensar que existe todavía un amplio espacio de exploración de posibilidades de mejorar la eficiencia global de estas lagunas.

Las tecnologías actuales presentan una amplia gama de equipos que pueden ser empleados para obtener altos niveles de oxígeno, sin embargo esta eficiencia viene acompañada de un aumento en la demanda energética. En ocasiones, dicha demanda no puede justificar la rentabilidad que está produciendo en la unidad de tratamiento (Huang et al., 2013).



1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el consumo energético en las lagunas aireadas sin afectar el rendimiento de las mismas para el tratamiento de las aguas residuales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar variaciones de remoción de sustrato y concentraciones de oxígeno disuelto en las lagunas aireadas por medio de información histórica.
- Construir mapas de distribución de oxígeno disuelto en las lagunas aireadas según diferentes escenarios experimentales.
- Analizar patrones de flujo en las lagunas aireadas con los diferentes escenarios experimentales operación mediante el uso de trazadores flotantes.
- Plantear un posible escenario de operación para optimización energética con base en los resultados obtenidos.

1.3 HIPÓTESIS

El actual sistema operacional de los aireadores mecánicos ubicados en las lagunas aireadas de la PTAR de Ucubamba en Cuenca, puede ser mejorado estudiando la distribución del oxígeno disuelto en las lagunas, logrando un ahorro energético y económico.

1.4 ESTRUCTURA DE TESIS

El capítulo 1 contiene una breve introducción al problema planteado, la hipótesis, objetivos y la estructura de todo el documento.

El capítulo 2 incluye la revisión de literatura que contiene información enfocada al tratamiento de aguas residuales a través de las lagunas de estabilización e información relacionada con las lagunas aireadas facultativas de Ucubamba. Asimismo, se menciona el saneamiento ambiental en el Ecuador, los procesos biológicos y tecnologías para el tratamiento de aguas residuales.

El capítulo 3 presenta los materiales y métodos utilizados para la medición in-situ de oxígeno disuelto en cada escenario propuesto y la elaboración de mapas de distribución de oxígeno disuelto.

El capítulo 4 presenta los resultados junto con la discusión de los mismos.

Finalmente, el capítulo 5 incluye las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 SANEAMIENTO AMBIENTAL

Desde 1990 hasta la actualidad 2600 millones de personas tienen acceso a agua potable mejorada, de las cuales 1900 millones poseen agua potable canalizada (United Nations, 2015). Por otro lado, los recursos hídricos del planeta están siendo afectados de tal forma que es necesario tomar decisiones para su futura conservación. La falta de planificación de los gobiernos en la toma de decisiones sobre protección y conservación de cuerpos de agua ha producido un aumento en la contaminación hacia ellos (OMS & Unicef, 2015).



El acceso a fuentes de agua mejoradas y el saneamiento ambiental son fundamentales para el buen vivir y el desarrollo de todas las personas del planeta. Estos dos factores son importantes para el desarrollo de ciertos objetivos planteados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), como es la nutrición adecuada, la igualdad de géneros, la educación y la erradicación de la pobreza (OMS & Unicef, 2015).

En el año 2000 los Estados miembros de las Naciones Unidas suscribieron la Declaración del Milenio. El siguiente paso fue el planteamiento de los Objetivos del Desarrollo del Milenio (ODM) (OMS & Unicef, 2015).

En los ODM los líderes mundiales se comprometieron a enfrentar la pobreza extrema y conseguir el bienestar de las personas. Por lo tanto los ODM plantean una serie de objetivos y metas que los estados miembros deben alcanzarlas (ONU, 2012). El objetivo 7 se enfoca en dar una garantía a la sostenibilidad del medio ambiente en donde se incluyen metas para reducir el número de personas sin acceso a agua potable y a un saneamiento básico.

Tener acceso a agua potable y a servicios de saneamiento básico permite (SENPLADES, 2014):

- Disminuir la pobreza y la pobreza extrema debido a Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI).
- Mejorar la salud de la población y reducir enfermedades parasitarias y gastrointestinales.
- Disminuir la desnutrición infantil.
- Fortalecer la productividad territorial como servicios y turismo.

Un paso trascendental para el desarrollo de cualquier nación se logra al brindar tratamiento a las aguas residuales. La descarga de aguas residuales no tratadas provoca un impacto negativo al medio ambiente así también es un factor que interviene en la mortalidad de las personas.

2.1.1 AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

► ECUADOR EN EL MUNDO

Los ODM (OMS & Unicef, 2015), respecto al acceso de agua potable de fuentes mejoradas en el mundo se cumplieron en el año 2015, con un acceso del 91 % de la población a fuentes mejoradas frente al 88 % fijado como meta. Sin embargo, en términos de saneamiento, mundialmente no se pudo alcanzar los ODM, lográndose en el año 2015 el 68 % de acceso a servicios de saneamiento mejorado frente a la meta del 77 %.

Ecuador; sin embargo, es uno de los países que ha conseguido alcanzar dichas metas en los dos campos, dando la suficiente cobertura mejorada en agua potable y saneamiento a su población. La población ecuatoriana que usa fuentes mejoradas de agua potable está comprendida entre el 76 y el 90 %.

Desde el año de 1990 al 2015, Ecuador ha logrado aumentar 26 puntos porcentuales en el acceso a agua potable en hogares y locales (OMS & Unicef, 2015); de la misma manera, en

la Figura 2.1-1 se determina que del 76 al 90 % de la población ecuatoriana usa instalaciones de saneamiento mejoradas (OMS & Unicef, 2015):

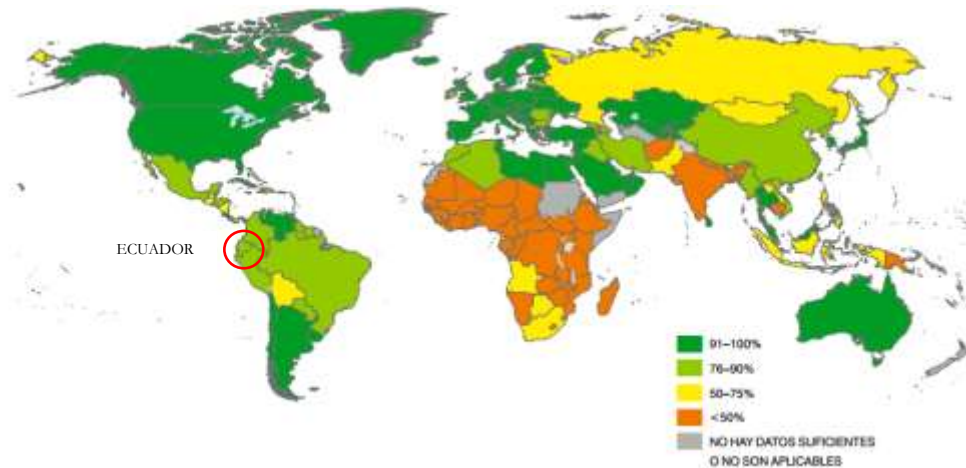


Figura 2.1-1. Uso de saneamiento mejorado a nivel mundial. Fuente: adaptado de OMS & Unicef (2015).

Se considera fuentes de agua potable mejoradas cuando por su construcción se mantiene protegida del exterior, por otra parte una instalación de saneamiento es mejorada cuando no existe un contacto entre las personas con los excrementos. En la Tabla 2.1-1 se presentan las tecnologías mejoradas y no mejoradas tanto de abastecimiento de agua potable como de saneamiento (OMS & Unicef, 2015).

Tabla 2.1-1. Tecnologías mejoradas y no mejoradas para el abastecimiento de agua y saneamiento. Fuente: adaptado de OMS & Unicef (2015).

Abastecimiento de agua	Saneamiento
<i>Tecnologías mejoradas</i>	
Agua corriente en el hogar	Conexión a una red pública de alcantarillado
Fuente de agua pública	Conexión a un sistema séptico
Pozo de sondeo	Letrina de sifón
Pozo excavado protegido	Letrina de pozo sencilla
Manantial protegido	Letrina de pozo mejorada con ventilación
Captación de agua de lluvia	
<i>Tecnologías no mejoradas</i>	
Pozo no protegido	Letrina de cubo (los excrementos se retiran de forma manual)
Manantial no protegido	
Agua comprada a vendedores ambulantes	Letrina pública
Agua embotellada	Letrina abierta
Agua de camión cisterna	

► SANEAMIENTO AMBIENTAL EN ECUADOR

En Ecuador el no tener acceso a agua potable y alcantarillado representa el 38% de la pobreza por NBI y el 64.1 % de la extrema pobreza por NBI. Por lo tanto, una estrategia del gobierno



para erradicar la pobreza es aumentar dichos servicios. Azuay tiene una cobertura del 83.3 y 71.2 % en agua potable y alcantarillado respectivamente (SENPLADES, 2014).

En alcantarillado, las provincias que tienen una alta cobertura son: Pichincha, Carchi, Imbabura, Tungurahua, El Oro y Azuay, mientras que Los Ríos y Bolívar tienen las más bajas coberturas en el país. La ciudad de Cuenca posee la mayor cobertura de la provincia del Azuay como se puede observar en la Figura 2.1-2.

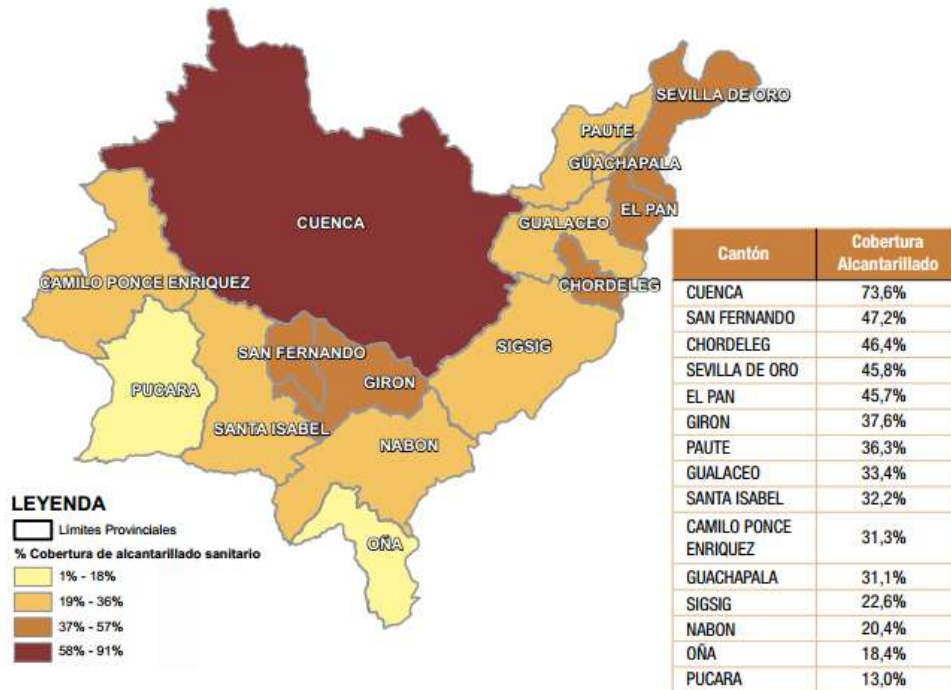


Figura 2.1-2. Cobertura de alcantarillado en la provincia del Azuay. Fuente: adaptado de SENPLADES (2014).

A nivel nacional, la población ecuatoriana recibe una dotación ponderada de agua potable de 200 l/hab.día, siendo sólo el 5 % de dicha dotación tratada luego de su utilización (sin considerar descargas industriales) (Cárdenas, 2012).

Por lo tanto se debe tratar las aguas residuales por dos motivos: las aguas residuales no tratadas provocan un impacto negativo al medio ambiente y por otro lado es un factor que interviene en la mortalidad de las personas. Es así que, es necesario conocer los tipos de organismos que provocan infecciones al ser humano, y cómo se los puede erradicar mediante un tratamiento a las aguas residuales (Mara, 2013).

2.1.2 ENFERMEDADES RELACIONADAS CON EXCRETAS

Según Mara (2013), las enfermedades relacionadas con excretas dependen de los factores descritos a continuación y se clasifican en 7 categorías (ver Tabla 2.1-2):

- Carga excretada: es el número de patógenos excretados por una persona infectada. En aguas residuales dependerá de la cantidad de personas infectadas.
- Latencia: intervalo entre excretar un patógeno y que éste se vuelva infeccioso a una persona. Cuando el patógeno se vuelve infeccioso inmediatamente después de su excreción, se le denomina no latente. La latencia puede variar de días a semanas.



- Persistencia: es el tiempo que un patógeno puede sobrevivir en el medio ambiente una vez excretado del cuerpo. Existen patógenos que pueden sobrevivir semanas o incluso años.
- Multiplicación: algunos patógenos pueden multiplicarse miles o millones de veces dependiendo de las condiciones ambientales.
- Infectividad: es la probabilidad infecciosa que posee un organismo, el cual puede ser alto, media o baja.
- Susceptibilidad: una persona será infectada dependiendo si es susceptible a dicha excreta.

Tabla 2.1-2. Enfermedades encontradas en aguas residuales. Fuente: adaptado de Mara (2013); Rengel (2000).

Categoría	Características de transmisión ambientales	Mayores ejemplos de infección	Organismo	Información
I Enfermedades feco-orales no bacteriana	No latente. Persistencia baja a media. Incapaces de multiplicarse. Infectividad alta. Sin huésped intermediario.	• Viral:		
		Hepatitis A y E	Hepatitis A y E	Patógeno excretado en las heces. Ingresa a través de vía oral. Higiene personal y doméstica muy baja. Foco de transmisión: personal, doméstico y agua residual.
		Diarrea por enterovirus	Enterovirus (67 tipos)	
		Diarrea por rotavirus	Rotavirus	
		Diarrea por norovirus	Norovirus	
		Infección respiratoria	Adenovirus	
		• Protozoario:		
		Amebiasis	<i>Entamoeba histolytica</i> , <i>Entamoeba dispar</i> y <i>Entamoeba moshkovskii</i>	
		Criptosporidiosis	<i>Cryptosporidium parvum</i>	
		Giardiasis	<i>Giardia lamblia</i>	
		Ciclosporosis	<i>Cyclospora cayentensis</i>	
		Balantidiasis	<i>Balantidium coli</i>	
		• Helmintos:		
		Enteriobiosis	<i>Enterobius vermicularis</i>	
		Fascioliasis	<i>Fasciola hepática</i>	
		Himenolepiasis	<i>Hymenolepis nana</i> e <i>Hymenolepis diminuta</i>	
		Ascariasis	<i>Ascaris lumbricoides</i>	
		Tricuriasis	<i>Trichures trichiura</i>	
II Enfermedades feco-orales bacteriana	No latente Persistencia media a alta Capaces de multiplicarse Infectividad media a alta Sin huésped intermediario	Antrax	<i>Bacillus Anthracis</i>	Transmisión de persona a persona. Algunos organismos provocan parálisis neuromusculares. Foco de transmisión: personal, doméstico, agua residual y cultivos.
		Brucelosis	<i>Brucella</i>	
		Campilobacteriosis	<i>Campylobacter</i>	
		Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>	
		Infección por E. Coli	<i>E. coli</i>	
		Legionelosis	<i>Legionella pneumophila</i>	
		Salmonelosis	<i>Salmonella</i>	
		Shigelosis	<i>Shigella</i>	
		Tifoidea	<i>Salmonella typhi</i> o <i>Salmonella paratyphi</i>	
		Yersiniosis	<i>Yersinia</i>	



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

III Geohelmincias	Latente Muy persistente Capaces de multiplicarse Sin huésped intermediario Infectividad muy alta	Ascariasis	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Organismos parásitos nematodos. Los huevos están en las heces. Fáciles de remover en los tratamientos de aguas residuales. Foco de transmisión: peridoméstico, agua residual y cultivos.
		Anquilostomiasis	<i>Ancylostoma duodenale</i> y <i>Necator americanus</i>	
		Estrongiloidiasis	<i>Strongyloides stercoralis</i>	
		Trichuriasis	<i>Trichuris trichiura</i>	
IV Taeniasis	Latente Persistente Capaz de multiplicarse Infectividad muy alta Vaca o cerdo es el huésped intermediario	Taeniasis	<i>Taenia saginata</i> y <i>Taenia solium</i>	Gusano <i>T. saginata</i> es transmitido por ganado vacuno y <i>T. solium</i> la transmite el cerdo. Foco de transmisión: peridoméstico, agua residual y cultivos de pasto.
V Helmintiasis a base de agua	Latente Persistente Capaz de multiplicarse Alta infectividad Huésped intermediario acuático	Esquistosomiasis	<i>Schistosomas</i>	Son muy fáciles de remover en el tratamiento de aguas residuales. Foco de transmisión: agua residual, pescado y especies o vegetales acuáticos.
		Clonorchiasis	<i>Clonorchis sinensis</i>	
		Fasciolopsiasis	<i>Fasciolopsis buski</i>	
VI Enfermedades por insectos vectores de enfermedades relacionadas con excretas		Filariasis de Bancroft transmitida por culex quinquefasciatus	<i>Wuchereria bancrofti</i>	Transmisión a través de mosquito. Presentes en PTARs sin limpieza. Ataca al sistema linfático. Foco de transmisión: agua residual.
VII Enfermedades por roedores vectores de enfermedades relacionadas con excretas		Leptospirosis	<i>Leptospira interrogans</i>	Infección debido a la orina de rata. Hemorragia en piel y ojos. Daña hígado y riñón. Foco de transmisión: agua residual.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES, PROCESOS BIOLÓGICOS Y TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO

La calidad del agua está directamente en función del uso del suelo en donde intervienen dos factores: el primero depende de las condiciones naturales, en donde se incorporan ciertas partículas al agua debido a la escorrentía superficial o a la infiltración, y el segundo depende de la interferencia de los seres humanos debido a descargas puntuales de aguas residuales domésticas e industriales, así como también una contaminación difusa debido principalmente a actividades agrícolas (Sperling, 2007).

Las aguas residuales están formados por un 99.9 % de agua, y el resto de material sólido. Generalmente la parte sólida tiene la siguiente distribución (Rojas, 2002):

- 70 % de material orgánico (65 % proteínas, 25 % carbohidratos y 10 % grasas), 30 % mineral (áridos, sales y metales).
- 20 % de material sedimentable, 80 % no sedimentable.
- 67 % del material sedimentable es orgánico, 33 % es mineral.
- 50 % del material no sedimentable es orgánico, 50 % es mineral.

El mejor tratamiento de aguas residuales es aquel que produce un efluente que cumpla con los requerimientos ambientales acompañados con el menor consumo económico y energético. Por lo tanto, dependiendo de las características de las aguas residuales y del efluente requerido, se debe elegir la tecnología de tratamiento más apropiada.



2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

► CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La Tabla 2.2-1 detalla de forma resumida las características físicas de las aguas residuales, cabe mencionar que muchos de los parámetros que aparecen en la tabla están relacionados entre sí.

Tabla 2.2-1. Características físicas de las aguas residuales. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Temperatura	Ligeramente mayor que en el agua potable. Varía de acuerdo con las estaciones del año (más estable que la temperatura del aire). Influye en la actividad microbiana, en la solubilidad de los gases y en la viscosidad del líquido.
Color	Agua residual fresca: ligeramente gris. Agua séptica: gris oscuro o negro.
Olor	Agua residual fresca: olor aceitoso, relativamente desagradable. Agua séptica: mal olor (desagradable), debido al gas sulfuro de hidrógeno y otra descomposición de los subproductos. Agua residual industrial: olores característicos.
Turbiedad	Causado por una gran variedad de sólidos suspendidos. Más concentrada en aguas residuales: generalmente mayor turbidez.
Absorción/Transmitancia	La absorbancia es la cantidad de luz absorbida por un constituyente en una solución. La transmitancia depende de los compuestos orgánicos e inorgánicos y de las partículas coloides.
Energía térmica	Calor asociado al lavado de ropa, lavado de platos y a los baños.
Conductividad	Habilidad de conducir la corriente eléctrica.
Densidad, gravedad específica y peso específico	La densidad del agua residual doméstica con bajo contenido residual industrial es similar al del agua. La gravedad específica y el peso específico dependen directamente de la temperatura.

► CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Según Metcalf & Eddy (2014) y Sperling (2007), las características químicas de las aguas residuales se pueden dividir en las siguientes categorías: sólidos totales (ver Tabla 2.2-2), materia orgánica (ver Tabla 2.2-3), nitrógeno total (ver Tabla 2.2-4), fósforo total (ver Tabla 2.2-5), materia inorgánica (ver Tabla 2.2-6) y gases (ver Tabla 2.2-7), los mismos que son descritos a continuación.

Tabla 2.2-2. Sólidos totales presentes en las aguas residuales. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Sólidos totales	<i>Orgánico e inorgánico; suspendidos y disueltos; sedimentables.</i>
Suspendidos	Parte de los sólidos orgánicos e inorgánicos que no son filtrables.
Suspendidos fijos	Compuestos minerales, no oxidable por el calor, inerte.
Suspendidos volátiles	Compuestos orgánicos, oxidables por el calor.
Disueltos	Parte de los sólidos orgánicos e inorgánicos que son filtrables.
Disueltos fijos	Compuestos minerales de los sólidos disueltos.
Disueltos volátiles	Compuestos orgánicos de los sólidos disueltos.
Sedimentables	Parte de los sólidos orgánicos e inorgánicos que se sedimentan en 1 hora en un cono de Imhoff. Indicación aproximada de la sedimentación en un tanque de sedimentación.



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

Tabla 2.2-3. Materia orgánica. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Materia orgánica	<i>Combinación de carbono, hidrógeno y oxígeno, y nitrógeno en algunos casos. Otros elementos como azufre, fósforo y hierro pueden encontrarse. Finalmente, la urea es un componente orgánico que se descompone muy rápido.</i>
Proteínas	Principal componente del organismo animal. Contiene carbono, hidrógeno, oxígeno y un alto porcentaje de nitrógeno.
Carbohidratos	Formados por azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera. Contiene carbono, hidrógeno y oxígeno.
Grasas animales, aceites y grasas	Fracción de la materia orgánica soluble en hexano. En agua residual doméstica, el origen son los aceites y grasas usados en las comidas, formados por carbono, hidrógeno y oxígeno. Por otro lado están los aceites minerales como el queroseno, aceites lubricantes y aceites de materiales bituminosos, formados por carbono e hidrógeno.
Agentes tensoactivos	Causantes de espumas en el agua.
Fenoles	Presentes en desechos industriales.
Pesticidas y productos químicos agrícolas	Presentes en aguas residuales debido a la escorrentía de parques, campos agrícolas y otras tierras.
<i>Determinación indirecta de materia orgánica</i>	
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno. Medido a los 5 días a los 20 °C. Asociada con la fracción biodegradable de los compuestos orgánicos carbonáceos.
DQO	Demanda Química de Oxígeno. Representa la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar la materia orgánica químicamente. Usa fuertes agentes oxidantes bajo condiciones ácidas.
DBO última	Demanda Bioquímica de Oxígeno última. Representa el oxígeno total consumido al final de algunos días por los microorganismos en la estabilización bioquímica de la materia orgánica.
<i>Determinación directa de la materia orgánica</i>	
COT	Carbono Orgánico Total. Medida directa de la materia orgánica carbonácea. Determinado a través de la conversión del carbono orgánico en dióxido de carbono.

Tabla 2.2-4. Nitrógeno total. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Nitrógeno total	<i>Incluye el nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrato y nitrito. Es un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos en el tratamiento biológico de aguas residuales.</i>
Nitrógeno orgánico	Nitrógeno en forma de proteínas, aminoácidos y urea.
Amoníaco	Producido en la primera etapa de la descomposición del nitrógeno orgánico.
Nitrito	Etapas intermedia en la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en las aguas residuales crudas.
Nitrato	Producto final de la oxidación del amoníaco. Prácticamente ausente en aguas residuales crudas.

Tabla 2.2-5. Fósforo total. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Fósforo total	<i>Existe en forma orgánica e inorgánica. Es un nutriente esencial en el tratamiento biológico de las aguas residuales y para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos.</i>
Fósforo orgánico	Combinado con la materia orgánica.
Fósforo inorgánico	Ortofosfatos y polifosfatos.



Tabla 2.2-6. Materia inorgánica. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Materia inorgánica	<i>Ciertos compuestos inorgánicos se encuentran en las aguas residuales debido al contacto del agua con la formación geológica.</i>
<i>Parámetros</i>	
pH	Indicador de las condiciones ácidas y alcalinas de las aguas residuales. Una solución es neutral con un pH de 7. Los procesos de oxidación biológicos normalmente tienden a reducir el pH.
Alcalinidad	Indicador de la capacidad reguladora del medio (resistencia en las variaciones de pH). Causado por la presencia de bicarbonato, carbonato e ion hidroxilo.
<i>Compuestos</i>	
Cloruros	Originados por el agua potable, residuos humanos e industriales.
Azufre	El ion sulfato es un compuesto natural de los suministros de agua y de las aguas residuales. El azufre es necesario para la síntesis de las proteínas y se libera en su degradación.
Compuestos tóxicos	Elementos como el cobre, plomo, plata, cromo, arsénico y boro son tóxicos para los microorganismos en ciertas concentraciones.
Metales pesados	El níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, cinc, cobre, hierro y mercurio son elementos constituyentes que están en las aguas. Algunos son necesarios para el proceso biológico pero en concentraciones altas son perjudiciales debido a su toxicidad.

Tabla 2.2-7. Gases. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Parámetro	Descripción
Gases	<i>Gases comunes de la atmósfera encontrados en las aguas residuales sin tratar son: nitrógeno, oxígeno y anhídrido carbónico. Gases producto de la descomposición son: sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano.</i>
Oxígeno disuelto	Necesario para la respiración de microorganismos aeróbicos. La cantidad de oxígeno depende de: la solubilidad del gas, presión parcial del gas en la atmósfera, temperatura y pureza del agua. A mayor temperatura menor oxígeno disuelto. Su presencia evita malos olores.
Sulfuro de hidrógeno	Producto de la descomposición de materia orgánica que contiene azufre, es decir, reducción de sulfitos y sulfatos minerales. En aguas residuales provoca el ennegrecimiento del agua y un olor a huevos podridos. Se elimina suministrando oxígeno.
Metano	Subproducto de la descomposición anaerobia. Pequeñas cantidades de oxígeno evitan la formación de metano. Sumamente combustible.
Amoníaco	El nitrógeno amoniacal en solución acuosa está como ion amonio.

► CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

En la Tabla 2.2-8 se describen los principales grupos de microorganismos presentes en las aguas residuales.

Tabla 2.2-8. Características biológicas de las aguas residuales. Fuente: adaptado de Metcalf & Eddy (2014); Sperling (2007).

Organismo	Descripción
Bacteria	Organismos unicelulares. Están presentes en varias formas y tamaños. Son los principales organismos responsables para la estabilización de la materia orgánica. Algunas bacterias son patógenas, causando principalmente enfermedades intestinales.
Arqueas	Similar en tamaño a la bacteria y en componentes celulares básicos. Es diferente a la bacteria en su pared celular, materia celular y composición de RNA. Importante en procesos anaeróbicos.
Alga	Organismo fotosintético autotrófico, conteniendo clorofila. Importante en la producción de oxígeno en los cuerpos de agua y en algunos procesos en el tratamiento de aguas residuales. En lagos y reservorios pueden proliferarse en exceso, deteriorando la calidad del agua.
Hongo	Predominantemente aeróbico, multicelular, no fotosintético, organismos heterotróficos. Importante en la descomposición de la materia orgánica. Pueden crecer en condiciones bajas de pH.



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

Protozoo	Suelen ser organismos unicelulares sin pared celular. La mayoría son aeróbicos o facultativos. Se alimentan de bacterias, algas y microorganismos. Esenciales en el tratamiento biológico para mantener un equilibrio de los diversos grupos. Algunos son patógenos.
Virus	Organismos parásitos, formados por la asociación de material genético (ADN, ARN) y una estructura de proteína. Son patógenos y son difíciles de remover en el tratamiento de agua potable o residual.
Helmintos	Animales de orden superior. Los helmintos en aguas residuales causan enfermedades.
Rotíferos	Consumen bacterias dispersas. Su presencia indica un proceso aerobio eficiente.
Crustáceos	Están formados por una coraza. Su presencia indica que hay bajas concentraciones de materia orgánica y abundante oxígeno disuelto.

2.2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los tratamientos biológicos proporcionan condiciones controladas para el óptimo crecimiento de diferentes tipos de microorganismos, los mismos que utilizan la materia orgánica biodegradable como sustrato, una parte de ella la oxidan y la otra la utilizan para la formación de nuevos microorganismos (Nodal, 2001).

Los microorganismos dentro de los procesos biológicos remueven la materia orgánica presente en las aguas residuales y lo transforman a productos gaseosos estables y tejido celular, limpiando de esta manera la DBO carbonosa disuelta y particulada inicialmente presente (Metcalf & Eddy, 2014; Universidad Autónoma de Chihuahua, 2008).

Básicamente, los microorganismos que participan en el tratamiento de aguas residuales son las bacterias, hongos, algas, protozoos y rotíferos en donde, las bacterias se destacan debido a su gran importancia en el proceso de conversión de la materia orgánica (Sperling, 2007).

► PROCESO AEROBIO

Es un proceso bioquímico que se lleva a cabo por un grupo de microorganismos cuyo metabolismo tiene lugar en presencia de oxígeno disuelto en las aguas residuales. Éstos descomponen la materia orgánica biodegradable, siendo los productos finales principalmente CO_2 y H_2O . Así también, como producto final se obtiene energía, la misma que es utilizada para la formación de nuevos microorganismos (Morrás, 2015; Sainz, 2005). La reacción global que tiene lugar en el proceso de digestión aerobia es la siguiente:

Materia orgánica + microorganismos + $\text{O}_2 \rightarrow$ Productos finales (CO_2 , H_2O , SO_4^{2-} , NO_3^- , etc.) + energía + nuevos microorganismos.

► PROCESO ANAEROBIO

Es un proceso bioquímico llevado a cabo por microorganismos en ausencia de oxígeno disuelto en las aguas residuales, mediante el cual ocurre la estabilización de materia orgánica biodegradable (Torres & Pérez, 2010).

El proceso anaerobio se lleva a cabo durante cuatro fases principales que son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Corrales et al., 2015).

- **Hidrólisis:** es la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas de cadena más corta y fácilmente solubles. Esta etapa condiciona las siguientes y es limitante en aquellas aguas residuales con contenidos importantes de sólidos en



suspensión, debido a que los microorganismos de las siguientes fases, solo actúan sobre los compuestos disueltos (Corrales et al., 2015; Sainz, 2005).

- **Acidogénesis:** aquí, los productos generados en la anterior fase son transformados en CO_2 , H_2 y una mezcla de ácidos grasos volátiles. Los microorganismos que participan en esta fase crecen muy rápido y son muy resistentes al medio. En esta fase no existen reducciones considerables de DQO (Sainz, 2005).
- **Acetogénesis:** en esta fase se aceleran los procesos metabólicos bacterianos y se produce ácido acético a partir de ácidos grasos volátiles generados en la anterior etapa y un grupo de microorganismos específicos (Corrales et al., 2015).
- **Metanogénesis:** aquí se obtiene metano a partir del ácido acético obtenido en la anterior fase o por reacción del hidrógeno con el CO_2 generado en la anterior etapa. Se lleva a cabo por un grupo de bacterias anaerobias estrictas y de crecimiento lento (Sainz, 2005).

La reacción global que tiene lugar en el proceso de digestión anaerobia es la siguiente:

Materia orgánica + microorganismos \rightarrow Productos finales (CO_2 + CH_4 + N_2 + S^{2-} , etc.) + nuevos microorganismos.

En la Figura 2.2-1 se muestran los productos que se forman a partir de la degradación aerobia y anaerobia:

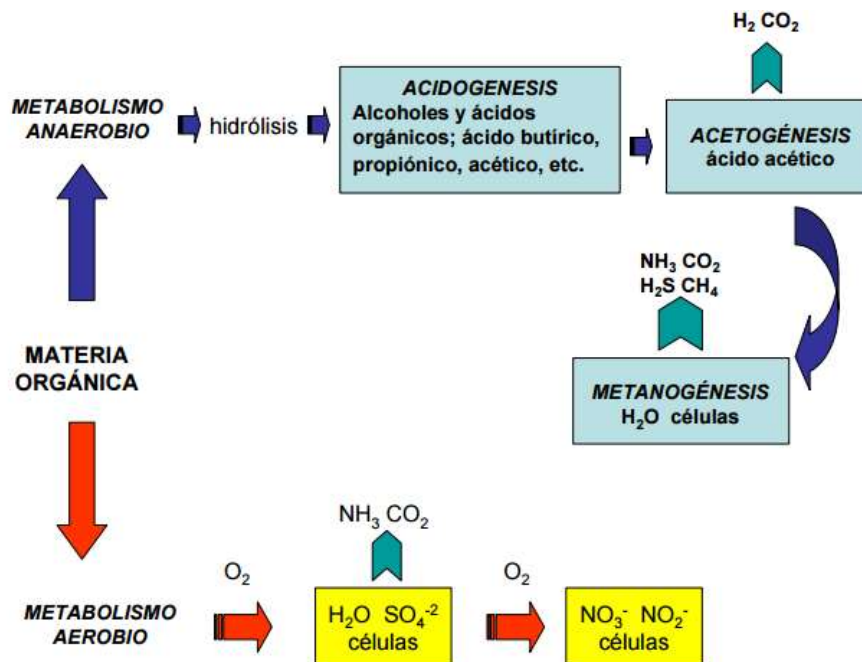


Figura 2.2-1. Degradación aerobia y anaerobia de la materia orgánica. Fuente: adaptado de Universidad Autónoma de Chihuahua (2008).

2.2.3 TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales, según los objetivos y la calidad del efluente buscado, se puede dar en diferentes niveles: tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario; y, en algunos casos, post-tratamientos avanzados. En la etapa preliminar se eliminan sólidos



suspendidos gruesos como materiales grandes y arena. En la etapa primaria se produce remoción de sólidos suspendidos sedimentables y de DBO particulada. En la etapa secundaria se remueven DBO particulada que no ha sido removida en la etapa primaria y remoción de DBO soluble. Finalmente, en la etapa terciaria se produce remoción de nutrientes, organismos patógenos, componentes no biodegradables, metales, sólidos disueltos inorgánicos y sólidos suspendidos restantes (Sperling, 2007). Los tratamientos avanzados como la microfiltración y la oxidación avanzada apuntan a reutilizar el agua tratada en actividades humanas incluyendo el agua potable.

Según Cerezo (2011) y Noyola et al. (2013), las tecnologías para tratar las aguas residuales crudas son las nombradas en la Tabla 2.2-9.

Tabla 2.2-9. Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Fuente: adaptado de Cerezo (2011); Noyola et al. (2013).

Tratamiento	Sistema	Variantes
Tratamiento preliminar	<ul style="list-style-type: none"> • Rejillas o cribas • Desarenadores 	Autolimpiantes o de limpieza manual.
	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanismos de medida de flujo 	Canal tipo Parshall; vertederos rectangulares o triangulares.
Tratamiento primario	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque de sedimentación primario 	Circular; rectangular.
	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque séptico • Tanque Imhoff 	Tanque de una o más cámaras.
Tratamiento secundario	<ul style="list-style-type: none"> • Lagunas 	Aireadas de mezcla completa; aireadas de mezcla parcial; anaerobias; facultativas, maduración.
	<ul style="list-style-type: none"> • Humedales 	Flujo superficial; flujo subsuperficial horizontal; flujo subsuperficial vertical.
	<ul style="list-style-type: none"> • Reactores anaeróbicos (ver Figura 2.2-2 y Figura 2.2-3) 	Digestor anaerobio convencional; digestor anaerobio de alta tasa; reactor de contacto anaerobio; filtros anaerobios; reactor UASB; reactor de lecho expandido/fluidificado.
	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados (ver Figura 2.2-4) 	13 variantes aproximadamente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Reactores de biopelículas aerobios (ver Figura 2.2-5 y Figura 2.2-6) 	Filtro percolador de alta tasa; filtro percolador de baja tasa; filtro aerobio sumergido; sistemas de discos biológicos rotatorios; reactor aerobio acoplado a membranas.
	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulación-floculación • Decantación • Filtración 	Microfiltración; ultrafiltración; nanofiltración; ósmosis inversa.
	<ul style="list-style-type: none"> • Desinfección 	Luz UV; cloración; ozonificación.

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

Tratamiento terciario	• Eliminación de Nitrógeno	Sistemas de nitrificación-desnitrificación conjunta; sistemas de desnitrificación de etapas separadas.
	• Eliminación del Fósforo	Sistemas biológicos; sistemas químicos.
	• Adsorción con carbón activo.	Carbón activo granular; carbón activo en polvo.

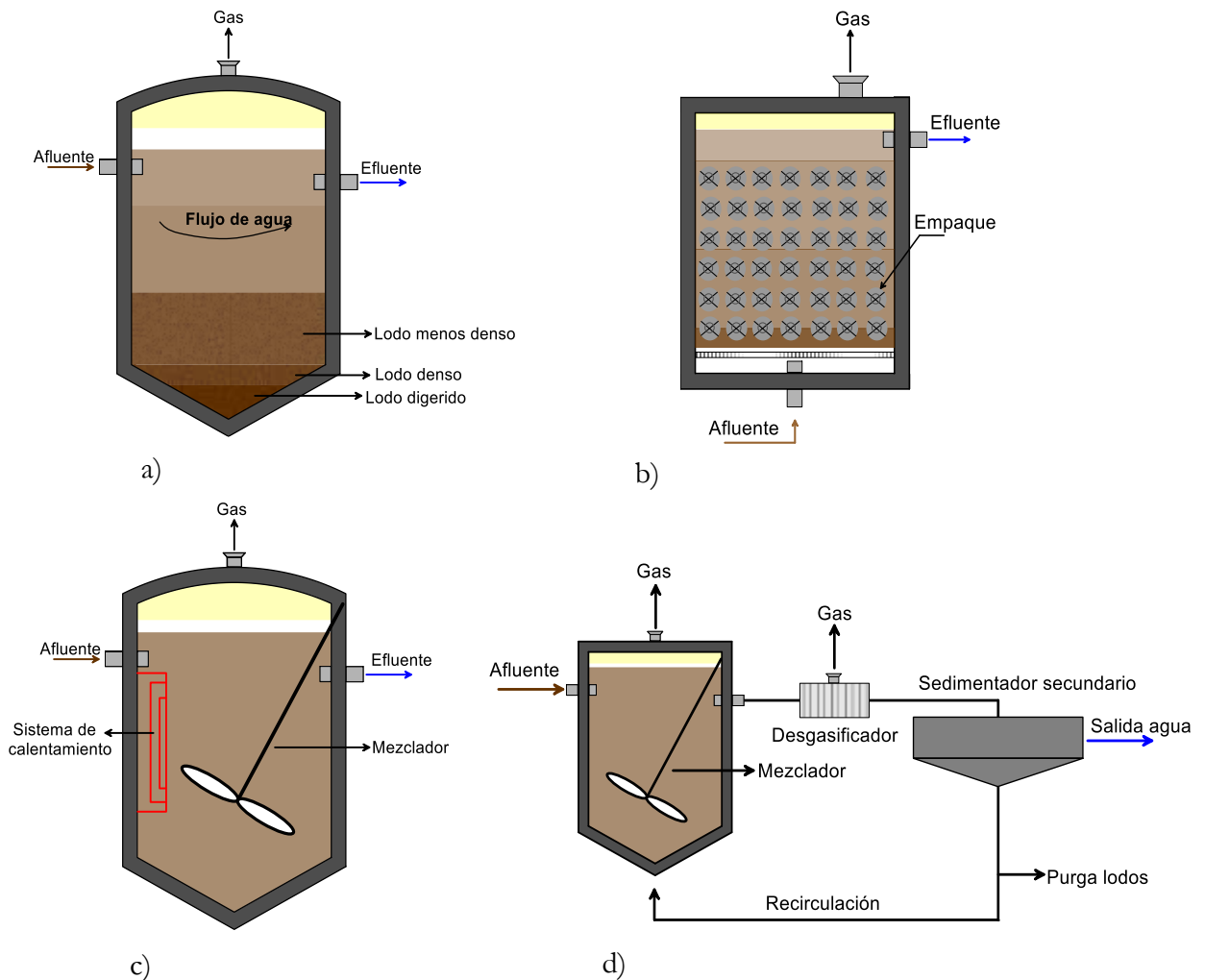


Figura 2.2-2. a) Digestor convencional; b) Filtros anaerobios; c) Digestor anaerobio de alta tasa; d) Digestor de contacto anaerobio. Fuente: autores.

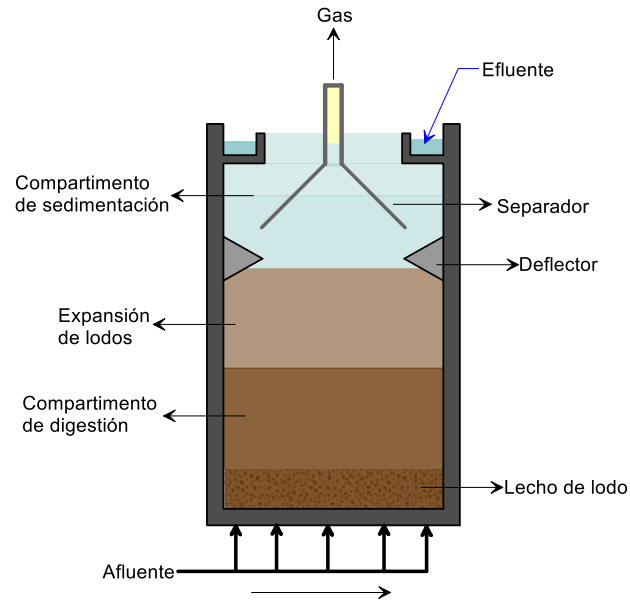


Figura 2.2-3. Reactor UASB. Fuente: autores.

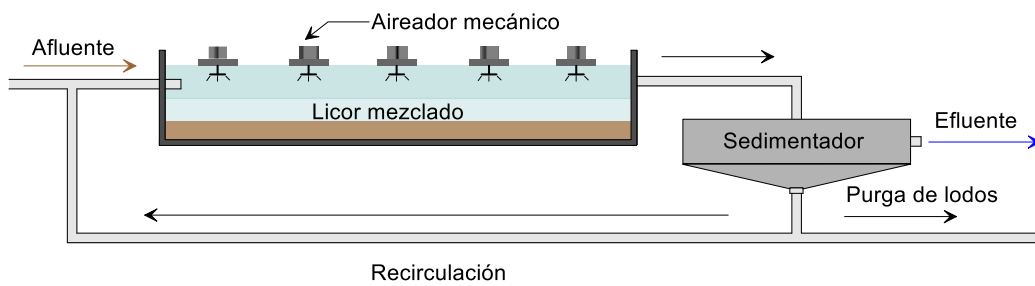


Figura 2.2-4. Lodos activados. Fuente: autores.

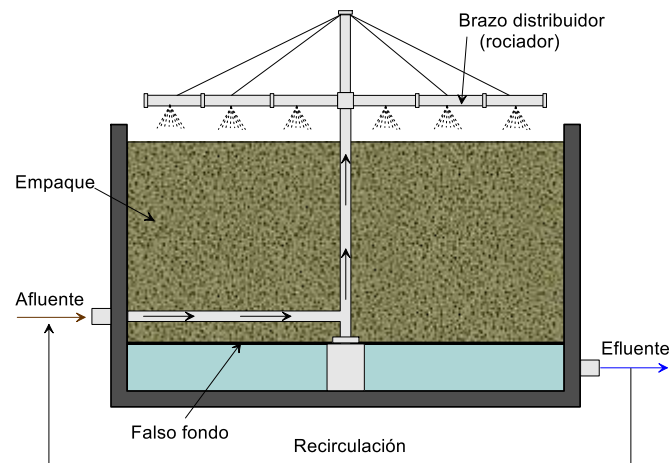


Figura 2.2-5. Filtro percolador. Fuente: autores.

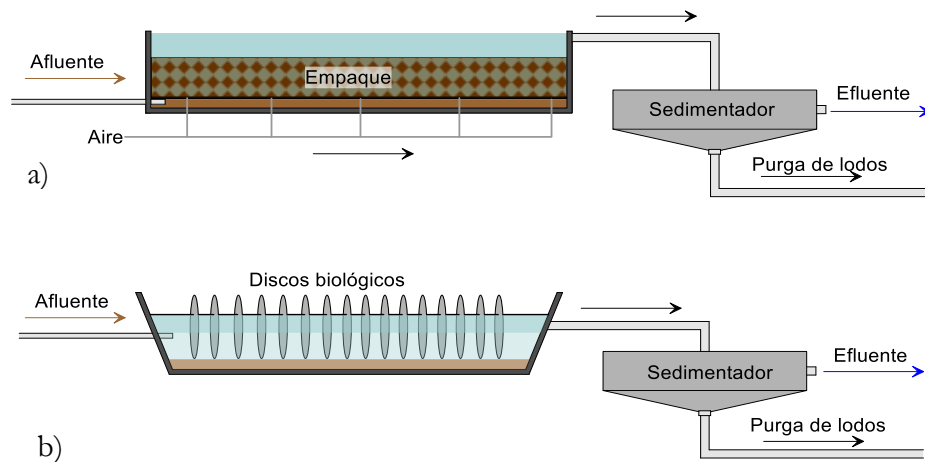


Figura 2.2-6. a) Filtro aerobio sumergido; b) Discos biológicos rotatorios. Fuente: autores.

2.3 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Hoy en día, las lagunas de estabilización constituyen una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales generadas por pequeñas y medianas poblaciones (Cárdenas, 2012).

Las lagunas de estabilización combinan simplicidad y bajo capital con un alto grado de purificación (Belila et al., 2013). Varios estudios realizados sobre la aplicación de este sistema en países en desarrollo, demostraron claramente que éstas pueden tratar aguas residuales en un muy alto nivel tanto en la remoción de compuestos orgánicos como en la de patógenos. Así también, se requieren recursos mínimos tanto en su diseño, construcción, mantenimiento y operación (Pérez-Foguet et al., 2003).

Uno de los primeros países en construir e investigar sistemas de lagunaje en América Latina, fue Costa Rica seguido cronológicamente de Panamá, El Salvador, Brasil, Colombia y Ecuador. En el Ecuador, existen varios sistemas lagunares de tratamiento que funcionan en forma aceptable en las ciudades de Guayaquil, Cuenca, Portoviejo entre las más representativas, y en comunidades de menor población como Manta, Milagro y en la provincia del El Oro y Los Ríos (Cárdenas, 2012).

2.3.1 FUNCIONAMIENTO

Las lagunas de estabilización son estructuras diseñadas y construidas para retener aguas residuales durante un cierto periodo de tiempo durante el cual se realicen diferentes procesos biológicos de estabilización de materia orgánica, y se entregue un efluente que cumpla con estándares de calidad. Éstos se han utilizado en unidades independientes o en combinaciones para el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales.

Los objetivos fundamentales de esta tecnología son: i) la eliminación de sólidos en suspensión, ii) la estabilización bioquímica de sólidos orgánicos coloidales y disueltos, iii) la eliminación de microorganismos potencialmente patogénicos presentes en las aguas residuales. Asimismo, uno de sus objetivos principales es la depuración de las aguas residuales para otros fines (Correa, 2008).

Existen diferentes tipos de lagunas cuyo objetivo fundamental es la remoción de materia orgánica carbonácea, las cuales pueden ser: lagunas aireadas facultativas, lagunas facultativas, lagunas anaerobias y lagunas de maduración (Sperling, 2007). Cada una de éstas posee un objetivo, funcionamiento y diseño diferente, sin embargo para obtener un rendimiento

eficaz, es frecuentemente recomendado que las mismas estén conectadas en una secuencia de tres o más unidades como se observa en la Figura 2.3-1.

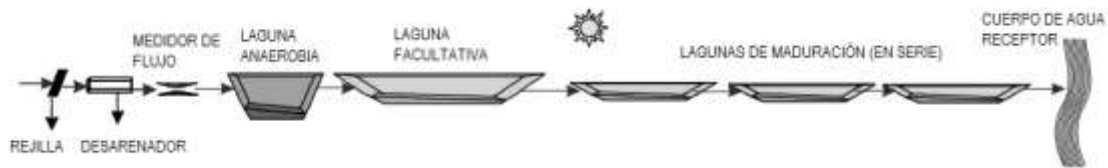


Figura 2.3-1. Esquema general de una PTAR mediante lagunaje. Fuente: adaptado de Sperling (2007).

2.3.2 LAGUNAS ANAEROBIAS

Generalmente son el primer tipo de una serie de lagunas (Mara, 2013). Este tipo de lagunas no cuentan con zonas aerobias a excepción de una capa muy delgada en su superficie (Matsumoto et al., 2011).

Las lagunas anaerobias son laguna de más de dos metros de profundidad (3.5 - 5 metros) con un tiempo de retención hidráulico corto que varía de 3 a 6 días, en el que se produce la digestión de la materia orgánica a través de bacterias anaeróbicas (Sperling, 2007).

Dichos sistemas funcionan como tanques sépticos abiertos sin mezcla y, como consecuencia del alto nivel de carga orgánica que éstos soportan, el efluente sigue conteniendo un alto porcentaje de materia orgánica (Chernicharo, 2007).

► REMOCIÓN

Según Mara (2013), en reactores anaerobios bien diseñados y no significativamente cargados, 1 día a una temperatura de 20 °C, es suficiente para lograr una remoción en el orden del 60% en aguas residuales con DBO_5 iniciales < 300 mg/l.

La remoción de sólidos suspendidos es del orden de 70%. Los mismos se acumulan en el fondo de la laguna, en donde son digeridos bajo condiciones anaeróbicas. Los gases producto de ello, forman burbujas que causan una fracción de lodos al subir y son los responsables de la nata que se forma en la superficie.

► OLOR

Según Mara (2013) y Sperling (2007) existe un cierto grado de incertidumbre en la incorporación de este tipo de lagunas debido a la posibilidad de la presencia de malos olores, como consecuencia de problemas de funcionamiento que pueden dar lugar a la reducción de sulfato a sulfuro de hidrógeno (a través de bacterias sulforeductoras), principal responsable de olores desagradables.

Si la concentración de sulfato en el afluente es inferior a 300 mg/l, la producción de sulfuro de hidrógeno no es problemática (en condiciones anaeróbicas, el sulfato se reduce a sulfuro). Se recomienda un valor límite de 250 mg/l como SO_4^{2-} (sulfato) (Mara, 2013).

► ACUMULACIÓN DE LODO

Normalmente la tasa de acumulación de lodos en los digestores anaeróbicos se encuentra en el orden de 0,03 y 0,10 m³/hab.año (Mara, 2013).

Debido a la rápida acumulación de lodos en este tipo de lagunas, es necesario una planificación apropiada referente a la gestión de lodos.

La Figura 2.3-2 hace referencia a un esquema general de una laguna anaerobia, en la que se puede observar los principales biogases formados a partir de la descomposición anaerobia del material sedimentado en el fondo de la laguna y la capa de natas que se forma a partir de su ascenso.

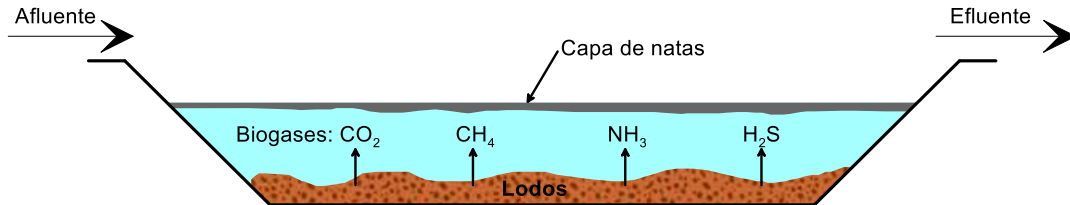


Figura 2.3-2. Laguna anaerobia. Fuente: autores.

2.3.3 LAGUNAS AIREADAS

Son sistemas diseñados para recibir, almacenar y tratar aguas residuales por un tiempo de retención hidráulico dependiente del tipo de laguna aireada, éstas incorporan unidades de aireación para oxigenar el sistema, las mismas pueden ser superficiales, turbinas o difusores; su profundidad generalmente varía de 3 a 5 metros (Dunner, 2004).

Las lagunas aireadas tienen como objetivo principal la asimilación de materia orgánica soluble en un periodo de retención corto pero suficiente para obtener porcentajes de remoción requeridos para el paso a la siguiente laguna que corresponde a una facultativa (Cárdenas, 2012; Yu & Mohn, 2001). En la Tabla 2.3-1 se muestran las ventajas y desventajas de las lagunas aireadas:

Tabla 2.3-1. Ventajas y desventajas de las lagunas aireadas.

Ventajas	Desventajas
Soportan grandes cargas orgánicas e hidráulicas.	Requieren grandes extensiones de suelo.
Eficientes en remoción de DBO5 y patógenos.	Alto consumo energético
No generan malos olores significativos.	Personal cualificado para la operación.
Reúso del agua tratada.	El lodo necesita un tratamiento adicional.

► TIPOS

La energía suministrada a través de la aireación mecánica es la base para su clasificación en dos categorías: lagunas aireadas de mezcla completa y lagunas aireadas facultativas (Alvarado et al., 2013).

Lagunas aireadas de mezcla completa: son sistemas esencialmente aeróbicos, en los cuales se utilizan aireadores mecánicos. Los aireadores garantizan una oxigenación y conservan dispersos a los sólidos suspendidos (biomasa) dentro de la laguna (Sperling, 2007). Dichas lagunas funcionan como unidades de lodos activados sin recirculación (Jácome et al., 2015).

La densidad de energía es igual o mayor a 3 W/m^3 , lo cual permite que los sólidos estén en suspensión. El tiempo de retención hidráulico varía de 2 a 4 días y la profundidad de 2.5 a 4

m (Sperling, 2007). Por otro lado, el porcentaje de remoción de DBO_5 oscila en el rango 60 al 80 % con la desventaja de transportar gran contenido de sólidos en su efluente (Dunner, 2004).

La Figura 2.3-3 hace referencia a un esquema general de una laguna aireada de mezcla completa con sus unidades de aireación, las mismas que oxigenan todo el sistema evitando la sedimentación de la DBO particulada.

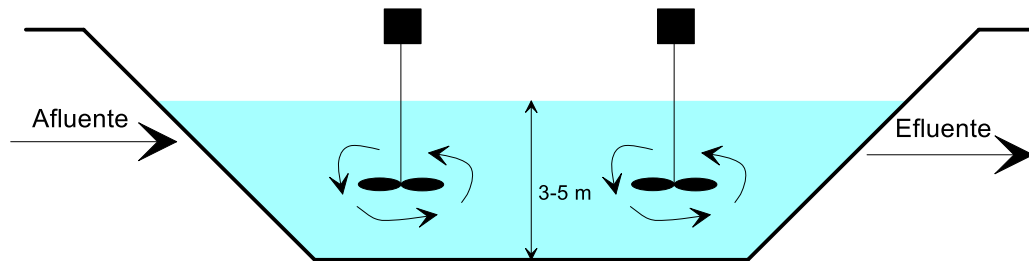


Figura 2.3-3. Laguna aireada aerobia de mezcla completa. Fuente: autores.

Lagunas aireadas facultativas: los aireadores de dichas lagunas generan una mezcla parcial, es decir, sólo una fracción de los sólidos se mantienen en suspensión, mientras que el resto se sedimentan en el fondo (lodo bentónico) (CONAGUA, 2015). Como consecuencia de ello, los lodos se descomponen anaeróbicamente, teniendo como efecto la presencia de burbujas de gas de gran tamaño en la superficie de la laguna.

La densidad de energía para mantener una mezcla parcial varía entre $0.75 - 1.50 \text{ W/m}^3$ (Sperling, 2007) y la remoción de DBO_5 varía de 50 al 70%, así también este sistema se basa el principio del proceso de lodos activados, sin recirculación de lodos (Dunner, 2004).

Si la carga orgánica excede a la cantidad de oxígeno inyectado, la laguna trabajará anaeróbicamente y generará malos olores (CONAGUA, 2015).

En la Figura 2.3-4 se observa una laguna aireada facultativa en la cual la oxigenación se da de forma parcial a través de la laguna como se mencionó con anterioridad, existiendo acumulación de lodos en zonas en donde no existe influencia del mismo.

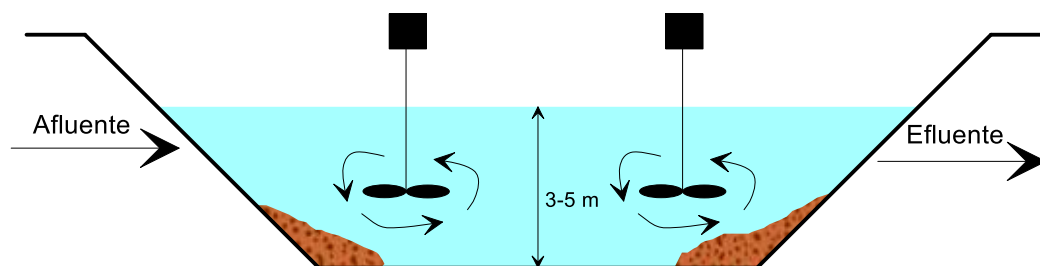


Figura 2.3-4. Laguna aireada facultativa. Fuente: autores.

En el capítulo 2.4 se detalla a profundidad el presente tema, por su gran relevancia dentro del estudio.



2.3.4 LAGUNAS FACULTATIVAS

Son el más común y versátil tipo de laguna de estabilización (Matsumoto et al., 2011) y, generalmente son utilizadas para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas y medianas poblaciones. Son de color verde oscuro como consecuencia de la gran cantidad de micro algas (Mara, 2013).

Este tipo de lagunas, poseen tiempos de retención hidráulico que varía de 15 a 45 días, con una profundidad típica de 1.5 a 2 metros (Sperling, 2007). Están diseñadas para una remoción de DBO_5 con base en una baja carga orgánica superficial en el rango de 100 – 400 $\text{kgDBO}/\text{hab.día}$ para de esta forma conseguir el desarrollo de una población algar sana (Rodríguez et al., 2003).

Existen dos tipos de lagunas facultativas: lagunas facultativas primarias, que reciben las aguas residuales crudas (después del tratamiento preliminar) y lagunas facultativas secundarias, que reciben aguas residuales con un tratamiento previo (generalmente el efluente de las lagunas anaerobias) (Mara, 2013).

Una laguna facultativa posee una zona superficial, una zona anaerobia inferior y una zona intermedia (Mahmood et al., 2013).

La carga orgánica superficial ($\text{kgDBO}/\text{hab.día}$) es el principal factor determinante en el espesor de la capas aerobias y anaerobias, así también influyen factores tales como la temperatura y las características de las aguas residuales.

Según Mara (2013), como resultado de las actividades fotosintéticas de las algas, existen variaciones diurnas en las concentraciones de oxígeno disuelto, debido a que, después de la salida del sol, el nivel de oxígeno disuelto se eleva gradualmente como respuesta a la actividad fotosintética, y durante la noche, cuando la fotosíntesis cesa, la actividad respiratoria consume oxígeno.

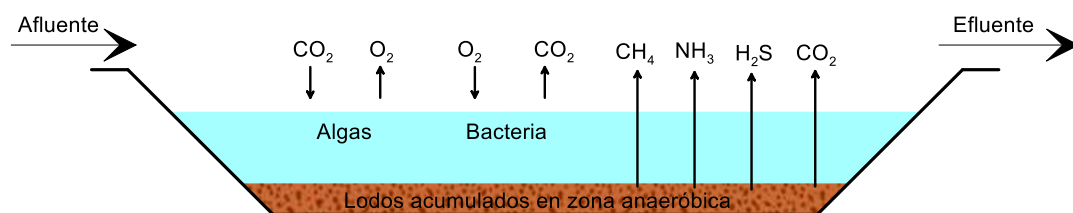


Figura 2.3-5. Laguna facultativa. Fuente: autores.

La Figura 2.3-5 hace referencia a una laguna facultativa. En la zona aerobia, las algas consumen CO_2 y producen O_2 . Por otro lado, las bacterias consumen O_2 y producen CO_2 . En la zona anaeróbica los lodos se depositan y se digieren produciendo gases de CO_2 , CH_4 , H_2S y NH_3 principalmente.

En las lagunas facultativas se produce el “oxypause” que hace referencia a una profundidad a la cual la concentración de oxígeno disuelto llega a cero, como consecuencia del equilibrio entre el oxígeno producido por las algas y el consumido por las mismas y microorganismos (Mara, 2013). Este nivel varía durante las 24 horas del día.



► DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La Tabla 2.3-2 muestra el proceso de respiración y fotosíntesis que se produce en una laguna facultativa.

Tabla 2.3-2. Ciclo de respiración y fotosíntesis. Fuente: adaptado de Sperling (2007).

Respiración	Fotosíntesis
Bacterias	Algas
Consumo de oxígeno	Producción de oxígeno
Producción de dióxido de carbono	Consumo de dióxido de carbono

Como consecuencia del tiempo de retención hidráulico, los rayos ultravioletas provenientes del sol y el aumento de pH por las actividades de las algas (en la fotosíntesis, los iones de carbonato y bicarbonato reaccionan para proporcionar más CO_2 , lo que deja un exceso de iones de hidroxilo, elevando el pH) se produce la sedimentación de huevos de helmintos y la mortalidad de bacterias fecales (Mara, 2013).

Las siguientes reacciones hacen referencia a la fotosíntesis y la respiración que se llevan a cabo en una laguna facultativa (Sperling, 2007).

Fotosíntesis: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Energía} \rightarrow \text{materia orgánica} + \text{O}_2$

Respiración: $\text{Materia orgánica} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Energía}$

El efluente de la laguna facultativa posee ciertas características: color verde debido a la presencia de algas y alta concentración de oxígeno disuelto.

► MEZCLA Y ESTRATIFICACIÓN

Según Mara (2013) la mezcla hidráulica minimiza los cortocircuitos y la formación de “espacios muertos”, así también asegura una distribución razonablemente uniforme de las algas, oxígeno disuelto y DBO.

Si no existe una adecuada mezcla dentro de la laguna se produce una estratificación térmica. Como consecuencia de ello, las capas superiores calientes se separan de las capas inferiores más frías por una región estática delgada del cambio brusco de temperatura, conocido como el “termoclina”.

► FACTORES DE INFLUENCIA

Según Correa (2008), los principales factores determinantes en la eficiencia de una laguna facultativa son:

Tabla 2.3-3 Parámetros que influyen en la laguna facultativa. Fuente: adaptado de Correa (2008).

Factor	Descripción
Temperatura	Afecta a la velocidad de la fotosíntesis y al metabolismo de las bacterias.
Fotosíntesis	Materia orgánica es oxidada por bacterias heterotróficas.
Radiación Solar	La luz se atenúa muy rápido debido a la turbiedad.
pH	En el día se alcanza valores superiores a 9.
Oxígeno disuelto	La capa oxigenada superficial presenta variaciones diurnas, disminuyendo en la noche.



Algas	La concentración de clorofila “a” se encuentra en un rango de 500 a 2000 mg/l. Los principales géneros son Chlamydomonas, Chlorella y Euglena.
-------	--

2.3.5 LAGUNAS DE MADURACIÓN

Las lagunas de maduración son lagunas cuya profundidad oscila entre 0.8 y 1.0 m, son utilizadas como procesos de tratamiento terciario y constituyen una opción económicamente viable en la desinfección del efluente (Sperling, 2007).

Generalmente, son construidas luego del tratamiento completo, es decir posterior a una laguna facultativa primaria o secundaria (Rolim, 2006). Y su tiempo de retención es aproximadamente de 6 días.

El propósito exclusivo del uso de las lagunas de maduración consiste en la remoción de coliformes fecales (FC) presentes en el efluente de una laguna facultativa a un grado adecuado para su reutilización, preferentemente en actividades agrícolas. Con un correcto diseño se puede conseguir remociones de coliformes fecales de hasta 99,999% (Rolim, 2006).

Según Mara (2013), las lagunas de maduración son aerobias en toda su profundidad, contienen una mayor diversidad de algas en comparación con las lagunas facultativas, sin embargo la concentración de biomasa algar es menor. Mientras menor profundidad tiene la laguna, existe un mayor porcentaje de remoción de coliformes fecales como consecuencia de la mayor penetración de radiación solar, valores altos de pH y la alta concentración de oxígeno disuelto (aumenta la tasa de eliminación debido a otros mecanismos como la fotooxidación).

► DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Según Sperling (2007), la mayor parte de los organismos patógenos tienden a morir fuera del tracto intestinal humano debido a que éste es su ambiente ideal para crecer. A continuación se indicarán algunos factores que contribuyen a la eliminación de agentes patógenos:

- **Bacterias y virus:** radiación solar, temperatura, pH, organismos depredadores (pulgas de agua), compuestos tóxicos, escasez de alimentos. Sin embargo, los mecanismos de remoción de los virus no son muy claros por lo cual, se asume que se sedimentan con los flóculos de los sólidos (Mara, 2013).
- **Quistes de protozoarios y huevos de helmintos:** debido a la sedimentación.

Como consecuencia de la alta remoción de los coliformes, el efluente cumple con la mayoría de los usos del agua en el cuerpo de agua receptor, y tiene gran importancia para la salud pública debido a que se alcanza una eliminación completa de quistes de protozoarios y huevos de helmintos en periodos de retención que varían de 5 a 15 días.

Según Mara (2013) los mecanismos más importantes en la remoción de organismos patógenos son: el tiempo, la temperatura y el pH.

Tiempo y temperatura: factores dependientes de la intensidad solar, existe una relación directa entre ellos, debido a que la temperatura de la laguna es consecuencia de la intensidad solar en la superficie de la misma, y mientras mayor sea el tiempo de exposición, mayor será la mortalidad bacteriana.



Cabe resaltar que tanto la tasa de crecimiento como la de mortalidad bacteriana se da más rápidamente a temperaturas altas.

pH: a valores de $\text{pH} \geq 9,4$ existe una mortalidad bacteriana muy rápida, dichos valores son consecuencia de la fotosíntesis de las microalgas.

Davis-Colley et al. (2000) encontró que la luz en longitudes de onda de hasta 700 nm ocasionan daños en las bacterias fecales, por otro lado, en longitudes de onda inferiores a 425 nm (incluida la UV) no son importantes en la remoción debido a que son absorbidas en los primeros milímetros del agua.

2.4 LAGUNAS AIREADAS FACULTATIVAS

Las lagunas aireadas facultativas son utilizadas cuando se requieren sistemas predominantemente aeróbicos. Su principal diferencia con las lagunas facultativas radica en la forma de suministro de oxígeno, debido a que en el presente caso se provee mediante aireadores, mientras que en las lagunas facultativas el oxígeno se obtiene a través de la fotosíntesis de las algas.

Dichos sistemas son más complejos que las lagunas facultativas en términos de mantenimiento y operación debido a la introducción de la mecanización. Asimismo, se requiere un mayor nivel operativo y gran demanda de energía.

La energía introducida por medio de los aireadores sirve para oxigenar la laguna, por ello los sólidos tienden a sedimentarse en el fondo de la misma generando un nuevo aporte de material orgánico y gases.

2.4.1 GENERALIDADES

- La oxigenación introducida por las unidades de aireación beneficia la mezcla de los agregados microbianos presentes en la solución, alcanzando a su vez la estabilización de la materia orgánica.
- Los niveles de energía son muy bajos como para mantener niveles requeridos de oxígeno disuelto en todas las partes de la laguna.
- Poseen una profundidad de 2.5 – 4 metros con un tiempo de retención hidráulico en el rango de 5 a 10 días (Sperling, 2007).
- Únicamente la zona de influencia de la unidad de aireación posee una mezcla completa (CONAGUA, 2015).

2.4.2 PROCESOS BIOLÓGICOS

Las lagunas aireadas albergan comunidades microbianas complejas que son responsables de la degradación y transformación de la materia orgánica, sin embargo, su estabilidad funcional está sujeta a diversas perturbaciones tales como variaciones del pH del afluente, temperatura, niveles de sustancias tóxicas y cambios climáticos estacionales (Yu & Mohn, 2001). Estudios han revelado que el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH son las variables que más influyen en las mismas (Moura et al., 2009).

Dentro de los grupos biológicos más importantes que contribuyen en la transformación de los compuestos orgánicos se encuentran los procariotas (Moura et al., 2009).



El proceso biológico que se lleva a cabo en las lagunas aireadas facultativas está constituido por bacterias, protozoos, hongos, algas, sin embargo las bacterias constituyen la mayor parte de la biomasa del proceso siendo de esta manera, el grupo dominante.

A pesar de que las comunidades microbianas juegan un papel clave en los procesos de tratamiento, existen muy pocos reportes científicos de la estructura y dinámica de las mismas dentro de las lagunas aireadas facultativas, por ello se espera que estudios ecológicos avancen de tal manera que ayuden a la mejor comprensión del tema, lo cual es fundamental para el mejoramiento en el diseño y rendimiento de dichas lagunas.

2.4.3 ASPECTOS BIOQUÍMICOS DE LAS LAGUNAS AIREADAS FACULTATIVAS

El afluente es sometido a aireación, lo que produce que en la capa superior de la laguna existan condiciones aeróbicas, en donde se sitúan un grupo de bacterias denominadas fotosintéticas (mayor exposición solar), productoras de oxígeno y materia orgánica (Corrales et al., 2015).

Debajo de ésta zona, están las bacterias heterotróficas aerobias consumidoras de oxígeno y materia orgánica, las mismas metabolizan la DBO soluble y coloidal además de las partículas sólidas finas, obteniendo como productos sólidos sedimentables o flóculos biológicos. Así también, se obtiene nuevo material celular y parte de ello, se oxida a través de la respiración endógena. Entre otro tipo de bacterias importantes son las bacterias quimioautotróficas, las cuales necesitan de condiciones aeróbicas para oxidar los compuestos. Aquí, con el uso del oxígeno se produce la nitrificación del amoníaco a nitritos y nitratos (Corrales et al., 2015).

En la zona intermedia facultativa, las bacterias utilizan el oxígeno (primordialmente) o el nitrato como receptores de electrones, lo que da lugar a reacciones bioquímicas tales como la desnitrificación, esta zona se encuentra en condiciones anóxicas (Sperling, 2007).

Como consecuencia de la cantidad de oxígeno suministrado, gran cantidad de sólidos entrantes y biológicamente producidos, junto con algas muertas sedimentan en el fondo, aquí se descomponen en condiciones anaerobias obteniendo subproductos tales como nuevo aporte de material orgánico (material sedimentado se transforma en compuestos más sencillos, material orgánico soluble) y gases (Amoníaco, Nitrógeno, Hidrógeno).

Los gases producidos en las zonas más bajas se estabilizan en la zona aerobia y esto reduce los problemas de malos olores.

Además del oxígeno disuelto en el sistema, son sumamente importantes los niveles de nutrientes, especialmente el fósforo, nitrógeno, potasio, calcio, etc. pues éstos sirven para desarrollar funciones de crecimiento, reproducción, locomoción, entre otros (Sperling, 2007).

Generalmente, los aireadores mecánicos más utilizados en este sistema son unidades de eje inclinado de alta velocidad como el que se observa en la Figura 2.4-1.

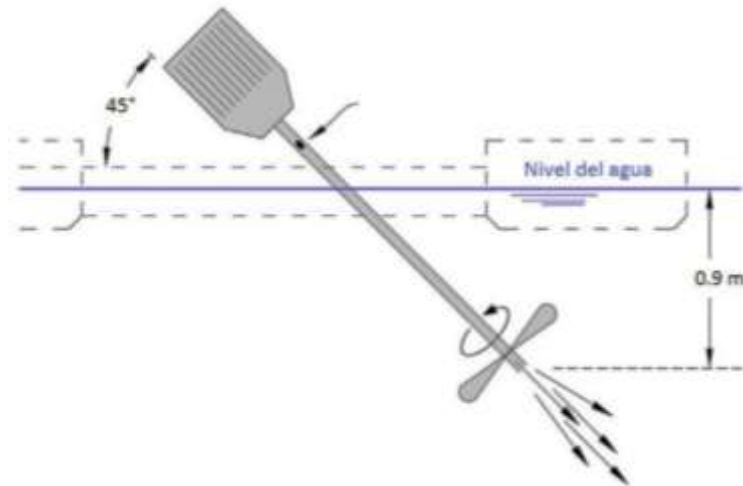


Figura 2.4-1. Esquema de un aireador mecánico de eje inclinado. Fuente: adaptado de Alvarado et al. (2011).

2.4.4 REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO Y ENERGÍA

► REQUERIMIENTO DE OXÍGENO

El oxígeno desempeña un papel fundamental en el tratamiento biológico aerobio, y la cantidad del mismo es suministrado a través de los aireadores (Sperling, 2007).

Los requerimientos de oxígeno para las lagunas aireadas facultativas puede expresarse con la Ecuación 2.4-1:

$$RO = a * Q * (S_0 - S)/1000 \quad \text{Ecuación 2.4-1}$$

En donde:

RO = requerimiento de oxígeno, kgO₂/día.

a = coeficiente con variación de 0,8 – 1,2 kgO₂/kgDBO₅.

Q = caudal del afluente, m³/día.

S₀ = DBO total (soluble + particulada) en al afluente, g/m³.

S = DBO soluble en el efluente, g/m³.

Como se mencionó anteriormente, las lagunas aireadas facultativas se asemejan a los lodos activados, sin recirculación de lodos. Es así que, según Metcalf & Eddy (2014), es necesario mantener una concentración mínima de OD de 1 mg/l, para de ésta manera satisfacer la DBO, los procesos de síntesis y respiración endógena de la biomasa y demandas adicionales de oxígeno (demanda bental del lodo y demanda por producción de gas metano en la digestión de los lodos). Así también, un reactor totalmente saludable tiene hasta 2 mg/l.

► REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA

Según Sperling (2007) se debe tener en cuenta los siguientes factores para una laguna que contiene aireadores mecánicos:

- Los aireadores deben estar colocados de forma homogénea en toda la laguna.



- Si la laguna es rectangular se debe colocar un mayor número de aireadores o aireadores más potentes en la entrada del flujo de la laguna, debido a la alta demanda de oxígeno que hay en esta zona.
- Los aireadores adyacentes deben estar colocados con sus direcciones de rotación opuestas.
- Si se desea concentraciones de sólidos suspendidos menores en el efluente, el área final debe de contener un número menor de aireadores. Según Sperling (2007), la concentración de SS en el efluente de una laguna aireada facultativa debe oscilar entre 50 y 100 mg/l.
- En lagunas pequeñas debe existir mínimo dos aireadores mecánicos.
- Se debe tener en cuenta las características comerciales de los aireadores.

Debido a la influencia de los aireadores, las lagunas aireadas están compuestas por dos zonas: zona de mezclado y zona de oxigenación. La primera mantiene una mezcla del líquido, provocando la presencia de sólidos en suspensión. La zona de oxigenación es más grande que la de mezclado, aquí se produce la propagación del oxígeno.

Los requerimientos de energía se basan en los requerimientos de oxígeno. Por lo tanto existe un parámetro llamado eficiencia de oxigenación (EO) en donde el oxígeno consumido se transforma en energía.

Se tienen valores de EO para condiciones estándar y otros para condiciones de campo. Para una condición estándar los valores son de 1.2 a 2.0 kgO₂/kW.h, mientras que para condiciones de campo se tiene que su valor varía de 55 a 65 % del valor de EO estándar (Sperling, 2007).

Por lo tanto el requerimiento de energía está expresada por la Ecuación 2.4-2:

$$RE = \frac{RO}{24 * EO_{campo}} \quad \text{Ecuación 2.4-2}$$

En donde:

RE = requerimiento de energía, kW.

RO = requerimiento de oxígeno, kgO₂/día.

EO_{estándar} = eficiencia de oxígeno en condiciones estándar, 1.2-2.0 kgO₂/kW.h.

EO_{campo} = eficiencia de oxígeno en condiciones de campo, 55-65 % de EO_{estándar}.

2.4.5 ACUMULACIÓN DE LODOS Y DEMANDA BÉNTICA

► ACUMULACIÓN DE LODOS

La acumulación de lodos provoca la pérdida de volumen útil de la laguna, de tal manera que disminuye el tiempo de retención hidráulico, así también existe un consumo adicional de oxígeno debido a la demanda béntica y a la oxidación de los gases anaerobios (Durazno, 2009). Una laguna opera en condiciones estables cuando la tasa de depósito de lodos es igual a la velocidad de descomposición de los mismos (Nelson et al., 2004).



En las lagunas aireadas facultativas y lagunas facultativas la tasa de acumulación de lodos está en el orden de 0.03 a 0.08 m³/hab.año (Sperling, 2007); sin embargo, existe una alta incertidumbre en esta cifra debido a las características propias del agua residual y otros factores ambientales.

La acumulación de lodo depende de (Abis & Mara, 2005):

- Condiciones ambientales (temperatura).
- Configuración de la entrada y salida de la laguna. Generalmente, se puede encontrar mayores cantidades de lodo en la entrada de la laguna.
- Profundidad de la laguna.
- Geometría de la laguna.
- Carga hidráulica.
- Operación de la laguna.
- Tasa de degradación anaeróbica del lodo.

Existen varias expresiones empíricas para estimar el volumen de lodos en función de ciertas características del agua residual. Por ejemplo, para Oakley (2005), la acumulación de lodos en lagunas facultativas se puede estimar con la Ecuación 2.4-3:

$$V_L = 0.00156 * Q_{med} * SS \quad \text{Ecuación 2.4-3}$$

En donde:

V_L = volumen de lodos producidos anualmente, m³/año.

Q_{med} = caudal promedio, m³/día.

SS = sólidos suspendidos en el afluente, mg/l.

Según Alvarado (2005), debido al corto tiempo de retención hidráulico y a la aireación mecánica de las lagunas aireadas de la PTAR de Ucubamba (10 aireadores en ese entonces de 75 HP), los sólidos se mantienen en suspensión y son evacuados en el efluente, provocando que en las lagunas secundarias facultativas se produzca una alta acumulación de lodo debido a la sedimentación. Por lo tanto, en el efluente de las lagunas facultativas, existe una muy baja carga de sólidos orgánicos, teniendo en las lagunas de maduración una acumulación de lodos casi nula.

En la Tabla 2.4-1 se muestra la acumulación de lodos en las lagunas de estabilización de Ucubamba que se obtuvieron a partir de batimetrías (utilizando varillas graduadas) en las fechas detalladas. La codificación de las lagunas se puede observar en la Figura 3.1-1.

Tabla 2.4-1. Acumulación de lodos en lagunas de estabilización de Ucubamba. Fuente: adaptado de Durazno (2009).

Fecha	2002	2003	2005	2009
<i>Laguna</i>		<i>Volumen de lodo (m³)</i>		
Aireada #1	8249	13831	19994	26635
Aireada #2	7789	11066	16895	20969
Facultativa 1	12739	22869	35401	55410
Facultativa 2		31273	44133	54540
Maduración1		5427	6312	7809
Maduración 2		4575	5553	4860
Total	-	89041	128287	170222
<i>Laguna</i>		<i>Altura promedio de lodo (m)</i>		
Aireada #1	0.27	0.46	0.67	0.89
Aireada #2	0.26	0.37	0.56	0.70
Facultativa 1	0.10	0.18	0.27	0.43
Facultativa 2		0.24	0.34	0.42
Maduración1		0.07	0.09	0.11
Maduración 2		0.08	0.10	0.09

A partir de la última batimetría manual realizada en el año 2009, se obtuvo el mapa de distribución de lodo acumulado en la laguna aireada #1 (Durazno, 2009) mostrado en la Figura 2.4-2.

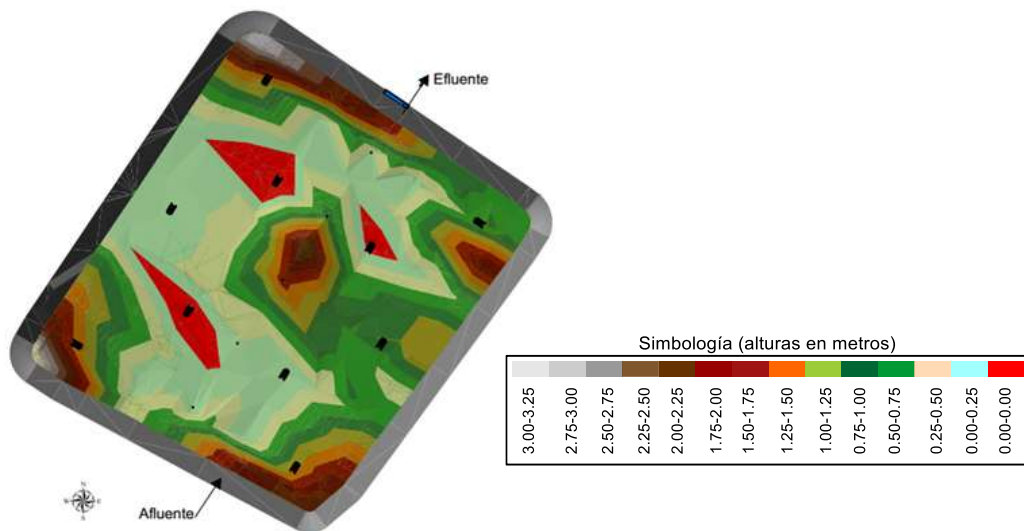


Figura 2.4-2. Acumulación de lodos en la laguna aireada #1. Fuente: adaptado de Durazno (2009).

Dicha batimetría se realizó en el año 2009, de tal manera que es importante considerar la constante acumulación de lodos, así como la incorporación de nuevos aireadores y la parcial utilización de una draga en la laguna.

► DEMANDA BÉNTICA

La demanda béntica de oxígeno o SOD (sediment oxygen demand), hace referencia a la cantidad de oxígeno que es consumido por la materia orgánica que contienen los sedimentos en un medio acuático (Baena et al., 2004).



La capa superficial de sedimentos está en contacto directo con el agua, por lo que generalmente hay una demanda de oxígeno. El oxígeno puede introducirse dentro de la masa de sedimentos, produciendo así un consumo del mismo. Por lo tanto, la SOD es producto de la combinación de procesos que consumen oxígeno debido al contacto entre sedimentos y agua (Suárez & Fernández, 2009).

Según Chapra (2008), la SOD se puede estimar mediante con la Ecuación 2.4-4:

$$f(SOD) = \sqrt{2K_D C_S J_C} \left\{ 1 - \operatorname{sech} \left(K_C \frac{o(0)}{SOD} \right) \right\} + r'_{on} a_{no} J_C \left\{ 1 - \operatorname{sech} \left(K_N \frac{o(0)}{SOD} \right) \right\} - SOD = 0 \quad \text{Ecuación 2.4-4}$$

En donde:

$f(SOD)$ = ecuación en función de la demanda béntica.

SOD = demanda béntica, $\text{gO}_2/\text{m}^2\cdot\text{día}$.

K_D = coeficiente de transferencia de masa por difusión del metano, $\text{m}/\text{día}$.

C_S = concentración de metano (considerando saturación y burbujas) medido como equivalentes de oxígeno, mgO_2/l .

J_C = flujo descendente del carbono orgánico expresado como equivalentes de oxígeno, $\text{gO}_2/\text{m}^2\cdot\text{día}$.

$o(0)$ = concentración de oxígeno en la capa de agua superpuesta, mg/l .

K_C = tasa de descomposición del metano disuelto en la capa de sedimento aerobia, $\text{m}/\text{día}$.

K_N = tasa de oxidación del amoníaco a nitrógeno gas, $\text{m}/\text{día}$.

r'_{on} = tasa de demanda de oxígeno debido a la nitrificación corregida por desnitrificación, gO_2/gN .

a_{no} = rendimiento estequiométrico de nitrógeno debido a la descomposición de DBO sedimentada, gN/gO_2 .

El valor de J_C se puede calcular con la Ecuación 2.4-5:

$$J_C = V_s L_{pw} \quad \text{Ecuación 2.4-5}$$

En donde:

V_s = velocidad de sedimentación de las partículas orgánicas, $\text{m}/\text{día}$.

L_{pw} = concentración de DBO particulada en el agua, mg/l .

2.4.6 HIDRÁULICA DE LAGUNA

► TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

La acumulación de lodos en lagunas de estabilización, además de reducir el volumen útil de éstas, provoca la aparición de cortocircuitos y espacios muertos en las lagunas (Alvarado et al., 2013; Bracho & Aldana, 2009). Por lo tanto, la acumulación de lodos causa un fuerte impacto en la hidráulica de la laguna, haciendo que la eficiencia en el tratamiento disminuya. Estudios realizados en cuatro lagunas en México por Nelson et al. (2004), demostraron que



al cabo de 5 – 15 años de operación, el volumen ocupado por el lodo estaba entre el 8 y el 25 % del volumen total (ver Tabla 2.4-2), produciendo una disminución del tiempo de retención hidráulico y la formación de trayectorias preferenciales del flujo y espacios muertos.

Tabla 2.4-2. Volumen de lodo ocupado en cuatro lagunas de estabilización en México. Fuente: adaptado de Nelson et al. (2004).

Laguna	Tipo de laguna	Periodo de operación (años)	Volumen de lodo ocupado (%)
Mexicaltzingo	Anaeróbica	5	25.3
San José	Facultativa	6	8.2
Texcoco	Facultativa	10	14.4
Xalostoc	Facultativa	15	13.2

Para una DBO doméstica promedio, Jácome et al. (2015) recomienda que el TRH en lagunas aireadas se debe mantener en los rangos mostrados de la Tabla 2.4-3:

Tabla 2.4-3. Valores de TRH recomendados para lagunas aireadas. Fuente: adaptado de (Sperling, 2007).

Tipo de laguna aireada	Promedio (días)		
	Mínimo	Promedio	Máximo
A mezcla completa	2	3	4
Facultativa	5	7	10

Estudios realizados por Bracho & Aldana (2009), usando trazadores con objetos flotantes (50 naranjas con el 98% de su volumen sumergidas), determinaron que zonas con vegetación en la superficie eran espacios muertos, ya que las naranjas se acumulaban en dichas zonas y se mantenían estáticas. Asimismo, se demostró que el viento aumenta la velocidad superficial (1.5 veces más que la velocidad promedio), formando cortocircuitos.

Muchos estudios han demostrado que el uso de *baffles* o deflectores ayudan en la hidráulica y en la eficiencia del tratamiento. El borde libre de los deflectores ayuda a que el viento no aumente la velocidad superficial, minimizando los cortocircuitos. Por lo tanto los deflectores ayudan en la hidráulica y tratamiento de la laguna en los siguientes aspectos: i) aumenta la eficiencia de remoción de DBO₅, DQO y Nitrógeno, ya que los microorganismos se adhieren a las paredes de los deflectores formando una biopelícula; ii) disminuye la concentración de sólidos totales y sólidos suspendidos; iii) disminuye el valor del número de dispersión (Bracho & Aldana, 2009).

► RÉGIMEN HIDRÁULICO

Los regímenes de flujo que se presentan en las lagunas de estabilización son el de mezcla completa y el flujo de pistón, uno totalmente opuesto al otro (Cruz et al., 2000).

La determinación del régimen de mezcla es sustancialmente importante, debido a que con ésta es posible tener una idea del comportamiento de las tasas de remoción de los nutrientes que llegan al sistema, del consumo de oxígeno y el modelo cinético de remoción de materia orgánica, entre otras. Es decir, la eficiencia de remoción en las lagunas de estabilización



además de depender de las transformaciones bioquímicas, depende del régimen de flujo hidráulico (Cruz et al., 2000; Saracho et al., 2006).

Generalmente una laguna aireada está diseñada de forma que tenga un régimen ideal de mezcla completa en estado estacionario.

En un reactor ideal de mezcla completa, todos los elementos que ingresan se dispersan de forma instantánea a través de todo el reactor, por ello la concentración de todos los componentes es la misma en cualquier punto del reactor (Sperling, 2007). Se puede decir que, idealmente, la concentración del efluente es igual a la concentración en cualquier punto del reactor (Cedillo & Matailo, 2011).

Considerando, un estado simplificado de análisis del balance de masas en un reactor de tratamiento; en un estado estacionario no se genera acumulación de constituyentes en el reactor ($dC/dt=0$), y además se considera que no existe una producción de constituyentes (tasa de producción de constituyentes $r_p=0$).

Es así que, teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente dichas, a partir de la ecuación de balance de masas (ver Ecuación 2.4-6), en la Tabla 2.4-4 se muestra la degradación de una sustancia a lo largo del reactor y en el efluente.

$$\frac{d(C.V)}{dt} = C \frac{dV}{dt} + V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + r_p V - r_c V \quad \text{Ecuación 2.4-6}$$

Tabla 2.4-4. Degradación de una sustancia en un reactor de mezcla completa. Fuente: adaptado de Sperling (2007).

Reacción	Concentración a lo largo del reactor (en un tiempo dado)	Concentración en el efluente
Sustancia conservativa, $r_c=0$	$C = C_0$	$C_e = C_0$
Sustancia biodegradable de orden cero, $r_c = K$	$C = C_0 - Kt$	$C_e = C_0 - Kt_h$
Sustancia biodegradable de primer orden, $r_c = KC$	$C = \frac{C_0}{1 + Kt}$	$C_e = \frac{C_0}{1 + Kt_h}$

En donde:

C = concentración en un punto dado del reactor, mg/l

C_0 = concentración en el afluente, mg/l.

C_e = concentración en el efluente, mg/l.

K = coeficiente de reacción, día⁻¹.

t = tiempo en un punto dado del reactor, día.



t_h = tiempo de retención hidráulico teórico, día.

2.4.7 PROBLEMAS OPERACIONALES

En la Tabla 2.4-5 se mencionan los principales problemas operacionales en una laguna aireada, las causas y medidas de prevención y control.

Tabla 2.4-5. Principales problemas operacionales en las lagunas aireadas, causas y medidas de prevención y control. Fuente: adaptado de Sperling (2007).

Problema	Causa	Medida de prevención y control
Ausencia de oxígeno disuelto en algunos puntos	<ul style="list-style-type: none"> • Mala disposición de los aireadores. • Sobrecarga orgánica a la entrada de la laguna. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambiar la disposición de los aireadores.
Aparición de malos olores y moscas	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos acumulados en las esquinas y el fondo de la laguna. • Crecimiento de vegetación acuática. 	<ul style="list-style-type: none"> • Retirar el lodo acumulado. • Retirar la vegetación acuática.
Oxígeno disuelto variable, flóculos dispersos y espuma	<ul style="list-style-type: none"> • Agua residual industrial. • Aireación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar la operación de los aireadores. • Monitoreo de oxígeno disuelto para establecer la forma ideal de funcionamiento de los aireadores. • Mantener niveles de oxígeno de 1 mg/l o más. • Identificar aguas residuales industriales que causan espumas.

2.5 AIREADORES MECÁNICOS

La correcta selección del equipo aireador en la laguna aireada conlleva un análisis de la demanda de oxígeno, asegurando de esta manera seleccionar un sistema que alcance el rendimiento esperado sin exceder la demanda energética razonable.

2.5.1 TIPOS DE AIREADORES

Según CONAGUA (2015), la transferencia de oxígeno en las lagunas aireadas es realizado mediante aireadores sumergidos y aireadores superficiales.

► AIREADORES SUMERGIDOS

Aireación por difusión: este sistema usa difusores que inyectan aire comprimido a presión. Dichos difusores pueden ser soportes porosos, placas o tubos contruidos con granos de sílice u óxido de aluminio los cuales van pegados con una pasta cerámica porosa. De la misma manera existen tubos de acero corrugado inoxidable cubiertos de nylon, saran o dracon (Cerezo, 2011; Hernández, 2015).

Los difusores están diseñados de tal forma que produzcan burbujas de oxígeno pequeñas o grandes, siendo las burbujas pequeñas más eficientes que las grandes debido a la mayor área específica de contacto con el líquido (Cerezo, 2011).

Aireadores de turbina: el aire ingresa por una tubería colocada en el fondo, mientras que el movimiento de la turbina dispersa las burbujas de agua y mantiene mezclada el agua (ver Figura 2.5-1). Según la salida del aire puede ser de flujo axial o radial (CONAGUA, 2015).

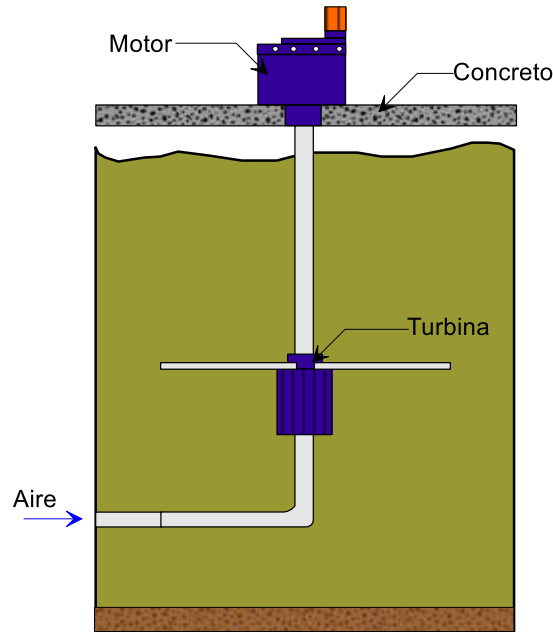


Figura 2.5-1. Aireación mediante turbina. Fuente: autores.

► AIREADORES SUPERFICIALES

Aireadores mecánicos: es un sistema muy simple y usado, con variaciones de potencia de 1 a 100 HP. Están formados por un impulsor conectado a un motor mediante una flecha (ver Figura 2.5-2). Dependiendo si hay fluctuaciones en los niveles de agua, todo el sistema puede estar montado en una estructura fija de concreto o en flotadores de acero inoxidable o fibra de vidrio rellenos con poliuretano u otra configuración similar (CONAGUA, 2015).

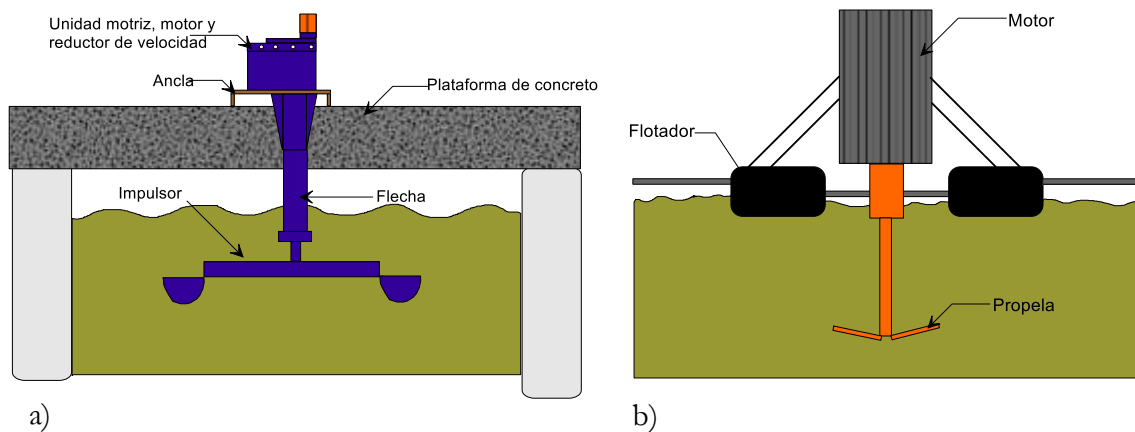


Figura 2.5-2. a) Aireador mecánico superficial fijo; b) Aireador mecánico superficial flotante. Fuente: autores.

Aireadores tipo cañón: su potencia varía desde los 2 hasta los 100 HP. Este sistema está formado por un motor, un tubo de inyección de aire y una hélice, los cuales van montados en una balsa (ver Figura 2.5-3). Su ventaja es que se puede inclinar dicho inyector de aire produciendo corrientes de agua que sirven para que no se sedimente el lodo y generen el movimiento del agua y la mezcla deseada (CONAGUA, 2015).

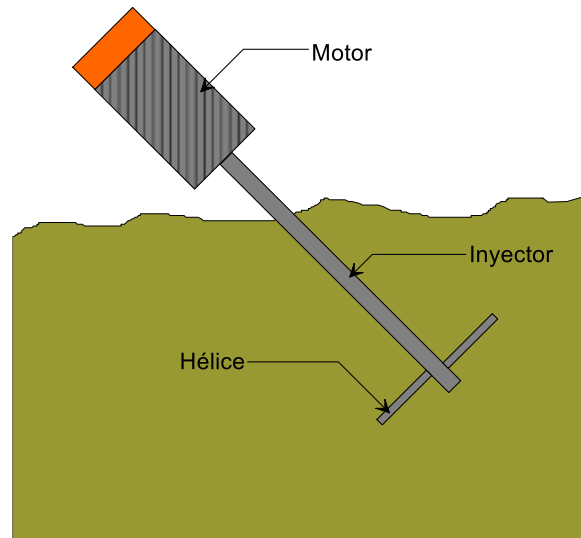


Figura 2.5-3. Aireador tipo cañón. Fuente: autores.

2.5.2 TRANSFERENCIA DE OXÍGENO

La transferencia de oxígeno es un parámetro muy importante para los microorganismos y por ende en la eficiencia del tratamiento biológico, así también es clave en la evolución y mantenimiento del sistema biológico aerobio.

Según Buitrago et al. (2013), la concentración de oxígeno disuelto en un reactor aerobio depende de:

- La tasa de transferencia de oxígeno de la fase gas al líquido.
- La velocidad de transporte de oxígeno hacia las células.
- La tasa de consumo de oxígeno por los microorganismos aerobios.

Según ETAPA & TYPISA (2004), la transferencia de oxígeno puede expresarse mediante la Ecuación 2.5-1:

$$TTOC = TTOE \left[\alpha \left(\frac{\beta * C_s - C_L}{C_s(20^\circ C)} \right) * \theta^{(T-20)} * Ef \right] \quad \text{Ecuación 2.5-1}$$

En donde:

TTOC = tasa de transferencia de oxígeno en condiciones de campo, kgO₂/kW.h.

TTOE = tasa de transferencia de oxígeno en condiciones estándar, a 20 °C y OD=0 mg/l. Varía entre 1.5 a 2.0 kgO₂/kW.h.

$$\alpha = \frac{\text{Tasa de transferencia de } O_2 \text{ en las AR}}{\text{Tasa de transferencia de } O_2 \text{ en el agua pura}} \quad \text{Ecuación 2.5-2}$$



α = factor de corrección de transferencia de oxígeno, 0.7 para AR domésticas.

$$\beta = \frac{\text{Saturación de la concentración de } O_2 \text{ en las AR}}{\text{Saturación de la concentración de } O_2 \text{ en el agua pura}} \quad \text{Ecuación 2.5-3}$$

β = factor de corrección de salinidad-tensión superficial, 0.9 para AR domésticas.

C_s = saturación del oxígeno en agua pura a una temperatura dada, mg/l.

C_L = concentración de OD en las lagunas, mg/l. Varía entre 0.5 a 2 mg/l.

$C_s(20^\circ\text{C})$ = saturación del oxígeno en agua pura en condiciones estándar, usando rotores, a 20°C , al nivel del mar = 9.17 mg/l.

Θ = coeficiente de temperatura, igual a 1.024 para aireación mecánica.

T = temperatura media anual, $^\circ\text{C}$.

E_f = Eficiencias del motor y reductor.

La corrección de C_{sw} a una determinada altura, está en función de la altitud, y se expresa con la Ecuación 2.5-4.

$$C'_s = C_s * \frac{P_A - P}{760 - P} \quad \text{Ecuación 2.5-4}$$

P_A = presión barométrica (ver Tabla A1-1), mm Hg.

P = presión de vapor de agua saturada a temperatura de las aguas residuales (ver Tabla A1-2), mm Hg.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En el presente capítulo se detalla la forma de obtención de datos, procedimientos experimentales y procesamiento de los mismos ejecutados en el desarrollo del trabajo de titulación. Se detalla las fuentes de los datos obtenidos y se destaca con minuciosidad las tareas realizadas en las campañas de monitoreo de oxígeno disuelto en la laguna aireada #1 que se realiza por primera vez en la PTAR de Ucubamba.

3.1 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

En el año 1984, la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca – ETAPA, inició un proceso de planificación tendiente a la recuperación de la calidad de los ríos que atraviesan la ciudad, con la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba, la misma que ha sido y continúa siendo por casi 18 años la planta más grande de tratamiento del país y una de las principales de Sudamérica localizada en altura. La PTAR de Ucubamba entró en funcionamiento en noviembre de 1999.

El sistema de lagunas de estabilización, como el presente en Ucubamba (ver Figura 3.1-1) es considerado como uno de los procesos más eficientes para el tratamiento de aguas residuales

de origen doméstico e industrial, así también como un proceso sencillo tanto operacional como constructivo. Sin embargo, para asegurar un éxito total en todas las fases de la vida útil de este sistema es necesario que sean establecidas políticas y organización administrativa, además de la disponibilidad de los recursos necesarios.

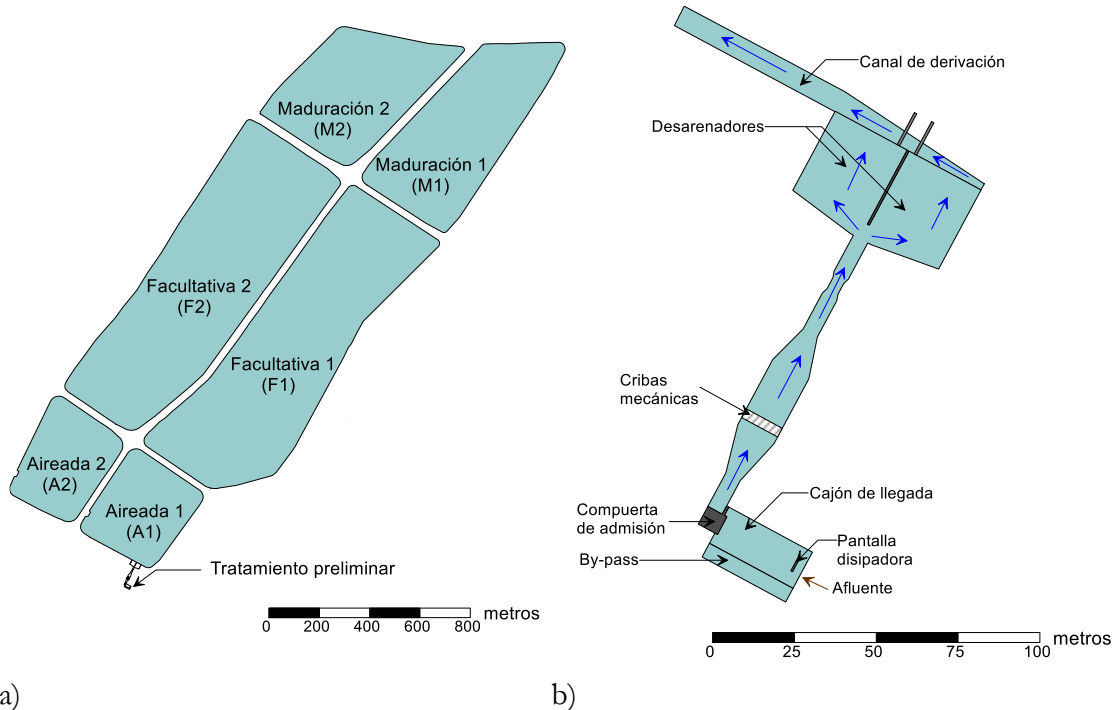


Figura 3.1-1. a) Sistema de lagunaje en la PTAR de Ucubamba; b) Tratamiento preliminar en la PTAR. Fuente: autores.

Los principales objetivos perseguidos con la PTAR de Ucubamba se pueden resumir en los siguientes (ETAPA, 2007):

- Recibir las aguas residuales que anteriormente eran descargadas en los ríos que atraviesan la ciudad.
- Tratar estos líquidos con la finalidad de evitar la proliferación de enfermedades y devolver al medio ambiente aguas libres de contaminación.

Como se observa en la Figura 3.1-1, la PTAR de Ucubamba cuenta con un proceso de depuración compuesto por estructuras de tratamiento preliminar y un sistema de lagunas de estabilización dispuestas en dos líneas, que comprende tres fases: lagunas aireadas, lagunas facultativas y lagunas de maduración.

3.1.1 UBICACIÓN

La PTAR de Ucubamba está ubicada en la zona noreste de la ciudad de Cuenca (ver Figura 3.1-2) capital de la provincia del Azuay, localizada en la zona andina al sur del Ecuador a una altitud de 2500 msnm., con una temperatura media anual de 15 °C.



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

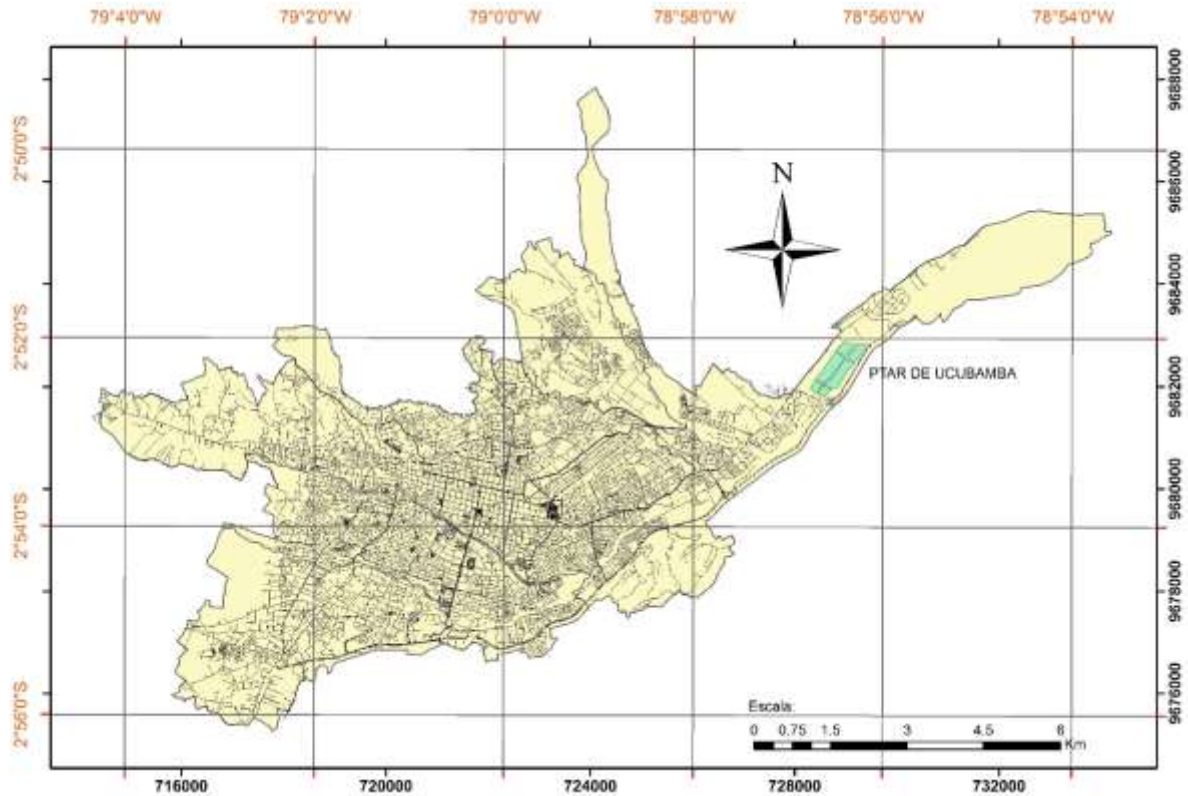


Figura 3.1-2. Ubicación de la PTAR de Ucubamba en la ciudad de Cuenca. Fuente: autores.

3.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La PTAR consta de un tratamiento preliminar y de un tratamiento secundario, el cual está formado por dos líneas funcionando en paralelo. Por último, el efluente final es trasladado por una estructura de desfogue al río Cuenca.

► TRATAMIENTO PRELIMINAR (ANEXO #2)

- Cajón de llegada: está formado por una pantalla de disipación de energía, un by-pass y una compuerta de admisión, que en conjunto permiten pasar el caudal de diseño al sistema y derivan los excesos directamente en el río durante los eventos de lluvia.
- Cribas mecánicas auto-limpiantes: retienen desechos sólidos y partículas flotantes de diámetro mayor a 20 mm y otros tipos de materiales que interfieran en el proceso biológico, en donde los desechos son cubiertos con cal.
- Desarenadores: localizados aguas abajo de las cribas. Están formados por dos módulos con una profundidad de 1.45 m y un área de aproximadamente 100 m² cada uno. Su función es retener y evacuar arena con un diámetro mayor a 0.2 mm. Asimismo, protege a los aireadores del desgaste y abrasión. El mecanismo para el retirado, transporte y lavado de la arena depositada en el fondo consiste en:
 - Raspador de fondo circular de 10 m de diámetro.
 - Mecanismo para el lavado de arena tipo tornillo.
- Canal de derivación: transporta el agua que viene de los desarenadores hasta llegar a una estructura de división del flujo para cada serie de lagunas, al final de dicho canal se dispone de una estructura de medición de caudales.



► TRATAMIENTO SECUNDARIO

Está formado por dos líneas de tratamiento, cada una con 3 lagunas en serie (lagunas aireadas, lagunas facultativas y lagunas de maduración). En todas las lagunas, los taludes son recubiertos de hormigón e impermeabilizada en el fondo con arcilla. El flujo entra en las lagunas mediante tuberías sumergidas de 0.9 m de diámetro con disipadores de energía cuadrados de 5.3 m. La salida está formada por un vertedero de 10 m de longitud con compuerta giratoria (Cedillo & Matailo, 2011).

- Lagunas aireadas: su propósito consiste en asimilar la materia orgánica soluble, permitiendo de esta manera la separación de sólidos y reducción de la carga orgánica; todo ello, en un tiempo de residencia corto. Poseen aireadores flotantes de alta velocidad de eje inclinado para una óptima transferencia de oxígeno, y de esta forma permitir al máximo la suspensión de los sólidos.
- Lagunas facultativas: almacenan y asimilan sólidos biológicos producidos en la anterior fase, presentan condiciones favorables para la mortalidad bacteriana y remoción de nematodos intestinales.
- Lagunas de maduración: la única diferencia con la anterior etapa radica en que éstas no poseen la capacidad para almacenar lodos.

En la Tabla 3.1-1 se muestran las características principales de las lagunas de estabilización de la PTAR de Ucubamba.

Tabla 3.1-1. Características de las lagunas de estabilización de Ucubamba Fuente: adaptado de Cedillo & Matailo (2011).

Característica	Laguna aireada	Laguna facultativa	Laguna de maduración
Área (ha)	3 (c/u)	13 (c/u)	7.4 (c/u)
Profundidad (m)	4.5	2	2
Inclinación de taludes (h:v)	2:1	2:1	2:1
Volúmenes (m ³)	135000 (c/u)	260000 (c/u)	148000 (M1) 112000 (M2)

3.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Desde su funcionamiento, la planta ha sido monitoreada controlando los parámetros físico-químicos y biológicos en el afluente y efluente final (ver Tabla 3.1-2 y Tabla 3.1-3).

Tabla 3.1-2. Parámetros de calidad del afluente. Fuente: adoptado de ETAPA (2015).

Parámetro	Unidad	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015
Caudal	l/s	1254	1211	1244	1192	1169	1206	1137	1237	1226	1229	1295	1254	1496	1583	1591
pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.19	7	7.08	6.64	6.08
DBO	mg/l	71	77	80	93	111	93	100	97	85	109	118	97	104	110	131
DQO	mg/l	226	246	227	224	259	219	248	240	205	261	293	235	236	272	287
S Totales	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	524	497	468	460	470
SS Totales	mg/l	150	147	136	148	146	159	144	150	148	200	247	220	199	189	212
SS Volátiles	mg/l	-	-	-	-	-	-	106	97	86	107	125	103	96	276	114
S.	ml/l	3.5	3.6	4.06	3.92	3.87	3.4	3.12	2.87	2.76	3.14	3.68	2.05	2	3	5.62
Sedimentables	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N. Amoniacal	mg/l	6.7	8.2	8.5	8.3	9.3	8	10	9.5	9.1	11	12	11	11	12	13
N. Orgánico	mg/l	7.5	9	8.8	8.1	7.2	6.7	8.3	7.4	7.4	9.7	9.6	7.3	10	5	12
Nitritos	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41	0.76	0.5	0.72	1.01
+Nitratos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fósforo	mg/l	5.2	4.9	4.5	4.6	5.5	4.8	5.6	5.6	5.3	5.8	5.2	4	4	4.08	4.33
Sulfatos	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	36	33	39	43
Sulfuros	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.16	<0.88	1	0.48	1.72
SS Hexano	mg/l	38	29	24	27	27	18	23	30	26	31	33	43	29	21	30



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

C. Termotolerantes	NMP/100 ml	2.38E+07	1.87E+07	1.29E+07	1.36E+07	1.10E+07	1.16E+07	1.46E+07	8.24E+06	8.07E+06	9.91E+06	1.27E+07	1.38E+07	1.14E+07	1.75E+07	1.06E+07
Parásitos	Nº/1	36	32	20	21	10	5.4	3.7	4.6	2.5	3.6	3.4	2.3	-	-	-
Aluminio	µ/l	1886	1274	<102	<142	1415	1169	1063	994	1360	1230	2657	2593	2954	3341	3514
Bario	µ/l	<8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	184	270	387	202
Cromo	µ/l	<36	<28	<10	<7.5	<6	<6.5	<7.8	<4.1	<4.4	<8	<5.5	<20	20	28	28
Cobre	µ/l	<48	<22	<17	25	<18	22	<33	<21	<18	35	28	44	29	23	26
Níquel	µ/l	<27	<28	<20	17	18	<16	<17	<16	<16	<15	23	<51	52	50	42
Zinc	µ/l	<188	<122	<122	<130	109	133	106	113	142	221	290	224	288	227	219
Plomo	µ/l	<64	<25	<17	<20	<18	<26	<33	<32	<27	<31	52	<100	69	54	48
Cadmio	µ/l	<2.7	<0.76	<0.72	<1.5	<5.1	<3	<5.5	<4.4	<3.1	<4.3	<6.1	<20	14	10	9
Arsénico	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<2.1	<33	30	33	29
Hierro	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2052	2149	2089	1632	1698
Manganeso	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	174	146	145	132	111
Mercurio	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.19	<6	6	8	7
Boro	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<94	90	86	70
Cobalto	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<11	10	13	10
Estaño	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<300	300	324	307
Plata	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<10	7	7	7
Selenio	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<200	200	194	176
Vanadio	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<8.9	10	16	17
P.	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2541	134	-	-	-
Organoclorados																
P.																
Organosfosforados	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2521	185	-	-	-

Tabla 3.1-3. Parámetros de calidad del efluente. Fuente: adoptado de ETAPA (2015).

Parámetro	Unidad	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015
pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.5	7.31	7.44	7.44	7.54
Color real	UC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.48	31.59	41.8	48.07	42.38
DBO Total	mg/l	15	15	15	18	21	19	21	18	19	16	27	22	27	25	31
DBO Soluble	mg/l	5.1	4.8	4.8	5.3	6.3	6.5	5.9	5.5	4.7	5	6.5	5.5	6.19	6.16	7.63
DQO Total	mg/l	86	97	100	99	101	90	92	75	74	74	101	67	78	85	104
DQO Soluble	mg/l	35	37	39	41	41	43	41	39	35	40	46	34	39	43	50
S Totales	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	332	305	316	311	316
SS Totales	mg/l	38	48	38	31	33	30	32	23	26	23	34	30	39	36	40
SS Volátiles	mg/l	-	-	-	-	-	-	30	23	26	22	33	28	34	34	42
S. Sedimentables	ml/l	0.22	0.4	0.39	0.16	0.11	0.12	0.09	0.05	0.12	0.04	0.02	0.02	0.06	0.05	0.4
N. Amoniacal	mg/l	8.1	12	12	12	13	13	15	13	13	16	16	15	15	14	15
N. Orgánico	mg/l	4.7	5.1	5.1	4.6	4	4.3	4.9	4.2	4.5	4.4	5.9	6.4	7.6	8.74	10.65
Nitritos + Nitratos	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.15	0.11	0.14	0.24	0.24
Fósforo	mg/l	2.3	2.5	2.2	2.2	2.6	2.4	2.9	2.7	2.5	3.1	3	2.1	2.09	3.74	2.45
Sulfatos	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43	35	35	37	43
Sulfuros	mg/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.13	<0.24	0.41	0.46	1.14
SS Hexano	mg/l	15	12	9.1	13	8.7	6.4	8.7	12	9	11	13	14	16	9	11
C. Termotolerantes	NMP/100 ml	<5.07	<5.27	8.96E+03	1.02E+04	1.12E+04	4.19E+03	>7.48	1.10E+04	>5.54	6.37E+03	4.60E+04	>5.70	1.19E+04	6.77E+04	1.06E+05
Parásitos	Nº/1	0.11	0.4	0.13	0.07	0.03	0.01	0	0	0	0	0.01	0	-	-	-
Aluminio	µ/l	<249	<417	<242	176	<315	<160	<129	182	<189	<191	277.3	195	245	206	150
Bario	µ/l	<8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<61	110	113	39
Cromo	µ/l	<14	<18	<7	<4.5	<3.9	<4.2	<4.8	<3.9	<3.3	<6.6	<3.2	<20	23	27	19
Cobre	µ/l	<29	<8.9	<11	<15	<8.7	<6.9	<20	<9	<6.9	7.7	13	<42	13	12	13
Níquel	µ/l	<26	<22	<17	<15	<13	<12	<15	<12	<14	<12	20	<50	<50	<50	47
Zinc	µ/l	<100	<46	<71	<66	<37	45	48	61	<79	65	35	35	85	44	52
Plomo	µ/l	<34	<15	<16	<60	<17	<13	<21	<19	<24	<22	40	<100	64	49	47
Cadmio	µ/l	<2.7	<0.51	<1.1	<1.3	<2.5	<2	<4.3	<3.2	<3.2	<2.9	<6	<20	13	<10	9
Arsénico	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1	<30	30	30	28
Hierro	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	415	397	422	393	355
Manganeso	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	123	112	103	95	89
Mercurio	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.05	<7.7	12	6.6	5.63
Boro	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<81	67	67.23	61
Cobalto	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<10	<10	16	9
Estaño	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<300	<300	296	277
Plata	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<10	7	11	7
Selenio	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<200	194	196	188
Vanadio	µ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<5	<5	6	6



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

P. Organoclorad os	μ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	133	296	-	-	-
P. Organofosfo rados	μ/l	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	873	182	-	-	-

3.1.4 OPERACIÓN DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE UCUBAMBA

Las lagunas aireadas de la PTAR de Ucubamba fueron diseñadas con un régimen de mezcla completa, sin embargo como consecuencia a la operación de los aireadores que mantiene la Jefatura, éstas se comportan como aireadas facultativas.

► ACTIVIDADES RUTINARIAS

La mayoría del personal operativo de las lagunas de estabilización se asocia con un mantenimiento sencillo es decir actividades como inspección de cribas, aireadores, dragas, cuchara anfibia, corte de césped, limpieza de vegetación acuática, extracción de lodos, entre otras. Dichas actividades son netamente preventivas para evitar los costos adicionales que conllevan las actividades correctivas.

La PTAR de Ucubamba cuenta con una Jefatura, operadores, laboratoristas, personal encargado de mantenimiento eléctrico y electromecánico y trabajadores manuales. Los operadores llevan a cabo inspecciones diarias en las lagunas en donde observan principalmente aspectos tales como la existencia de lodos, manchas verdes o negras, presencia de aceite, vegetación en contacto con el agua, etc.

► MUESTREO Y MEDICIONES

En la PTAR se realizan muestreos dos veces por semana (lunes – miércoles) en el agua cruda (muestras compuestas en volumen) y en cada una de las lagunas (aireadas, facultativas y de maduración) (muestras compuestas en tiempo); todo ello mediante muestreadores automáticos.

Las muestras se analizan en el laboratorio de la Dirección de Gestión Ambiental de ETAPA, localizado en los predios de la PTAR de Ucubamba. Los parámetros analizados se detallan en la Tabla 3.1-2 y Tabla 3.1-3.

3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HISTÓRICA RECOLECTA EN LAS LAGUNAS AIREADAS

3.2.1 PARÁMETROS DE CALIDAD

- La Jefatura de la PTAR de Ucubamba proporcionó datos crudos de parámetros de calidad (afuentes y efluentes) y caudales que ingresan a la planta.
- Dichos parámetros de calidad fueron medidos dos veces por semana (lunes y miércoles).
- A partir de las concentraciones y del caudal que ingresa a la PTAR, se pudo calcular con la Ecuación 3.2-1 las cargas anuales de DBO₅, DQO, SS, SSV, ST (2000-2015).

$$Carga \left(\frac{kg}{día} \right) = Concentración \left(\frac{kg}{l} \right) * Caudal \left(\frac{l}{día} \right) \quad \text{Ecuación 3.2-1}$$



- Se realizó un análisis del comportamiento histórico de: DBO₅, DQO, SS y SSV, considerando la concentración en el afluente y efluente así como el caudal que ingresa a la laguna de estudio (2013, 2014 y 2015).
- Se procedió a analizar la evolución de la eficiencia de remoción de DBO₅ (después de la implementación de los nuevos aireadores) a partir de la Ecuación 3.2-2:

$$\% R = \frac{[\alpha]A - [\alpha]E}{[\alpha]A} * 100 \quad \text{Ecuación 3.2-2}$$

En donde:

%R: Eficiencia de remoción.

[α]A: Concentración del parámetro en el afluente.

[α]E: Concentración del parámetro en el efluente.

3.2.2 OXÍGENO DISUELTO

- ETAPA proporcionó datos crudos correspondientes a concentraciones de OD de 5 meses (enero, febrero, marzo, abril y mayo del 2016), los mismos que se encuentran almacenados en el sistema SCADA (sistema de monitoreo remoto de parámetros tales como temperatura, pH y oxígeno disuelto, entre otros). El OD corresponde a las mediciones de un sensor ubicado cerca del efluente de la laguna y almacenadas cada 15 minutos por el sistema.
- Se realizó un análisis del comportamiento diario de oxígeno disuelto en la laguna de estudio.

3.3 PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS DE EXPERIMENTACIÓN

3.3.1 ESTRUCTURA DE LA LAGUNA AIREADA

Cada laguna aireada consta de 10 aireadores de 75 HP y 12 aireadores de 25 HP. Se identifica a cada aireador mediante un código (ver Figura 3.3-1), el cual se basa en indicar en qué laguna está (aireada, facultativa o maduración) (ver Figura 3.1-1), el número de laguna (aireada #1 o #2) y el número de aireador. El estudio se realizó en la laguna aireada #1.

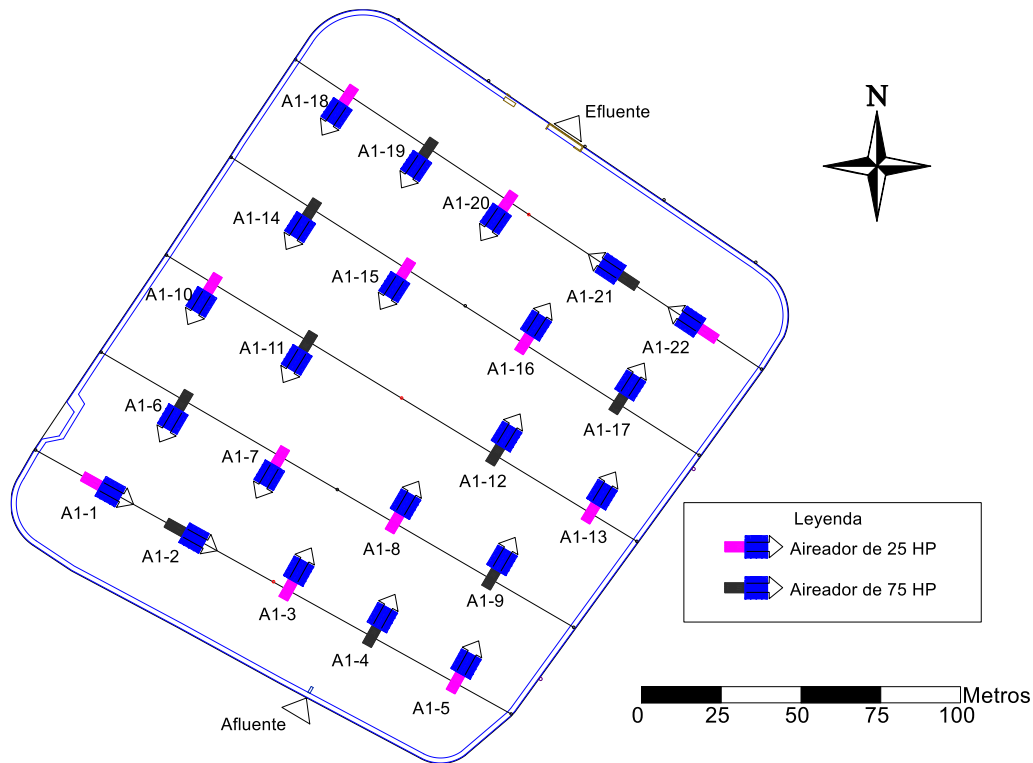


Figura 3.3-1. Disposición y códigos de los aireadores en laguna aireada #1, indicando la dirección de flujo. Fuente: autores.

3.3.2 ESCENARIOS EXPERIMENTALES

ETAPA, con el objetivo de optimizar los recursos energéticos que se destinan a la aireación en las lagunas aireadas, se ha creado escenarios de operación que implican el encendido y apagado de los aireadores durante el día.

Los escenarios que se han utilizado son varios; sin embargo, para el presente estudio se escogió los 4 escenarios de mayor utilización rutinaria. Estos escenarios son descritos a continuación:

- Escenario 1: escenario de mayor utilización de la PTAR. Implica distintas configuraciones de encendido y apagado durante tres intervalos horarios en 24 horas. En la Tabla 3.3-1 se muestran los aireadores encendidos y en la Figura 3.3-2 la disposición de los mismos.

Tabla 3.3-1. Escenario experimental 1.

Potencia aireadores	Aireadores encendidos	Potencia instalada (kW)
Intervalo 1 de 6 h:45 - 16 h:30		
25 HP	Todos (12 en total)	447.60
75 HP	A1-6, A1-9, A1-14, A1-17	
Intervalo 2 de 16 h:30 - 22 h:30		
25 HP	Todos (12 en total)	223.80
75 HP	Ninguno	
Intervalo 3 de 22 h:30 - 6 h:45		
25 HP	Todos (12 en total)	783.30
75 HP	Todos (10 en total)	



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

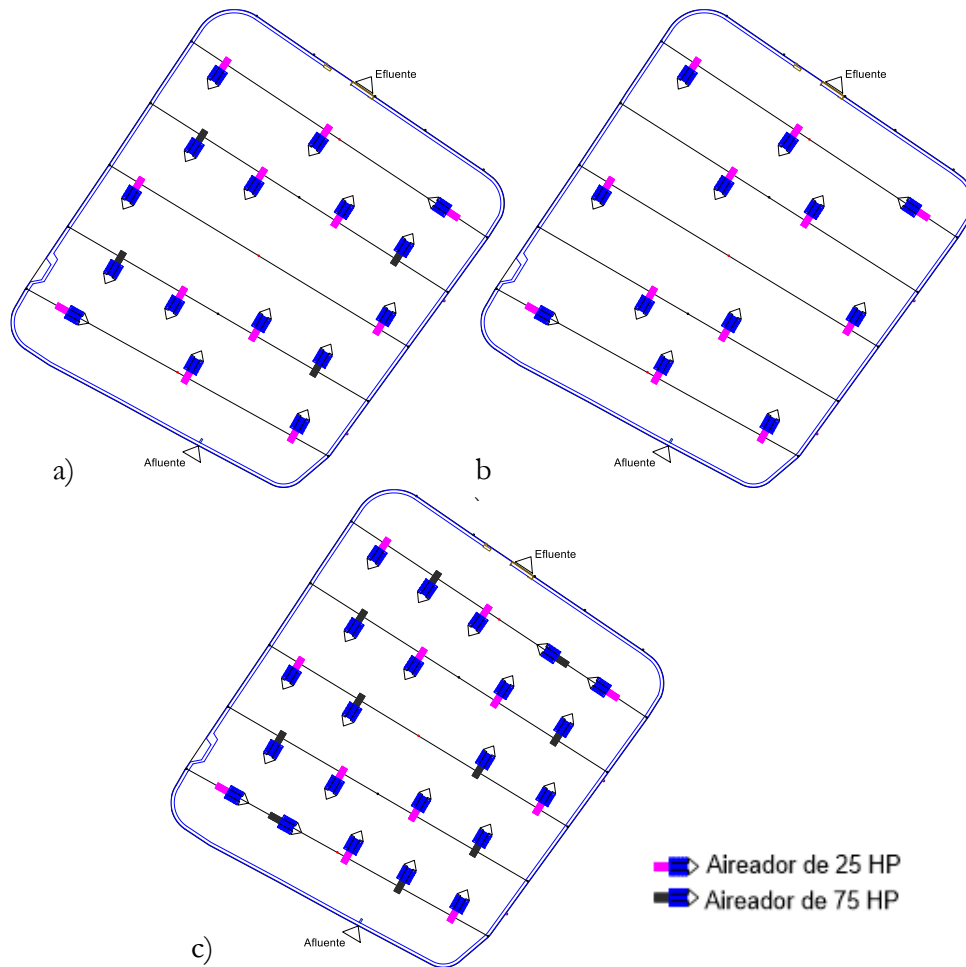


Figura 3.3-2. Disposición aireadores del Escenario 1: a) Intervalo horario 1; b) Intervalo horario 2; c) Intervalo horario 3. Fuente: autores.

- Escenario 2: En la Tabla 3.3-2 se muestran los aireadores encendidos y en la Figura 3.3-3 la disposición de los mismos.

Tabla 3.3-2. Escenario experimental 2.

Potencia aireadores	Aireadores encendidos	Potencia instalada (kW)
25 HP	Todos (12 en total)	783.30
75 HP	Todos (10 en total)	

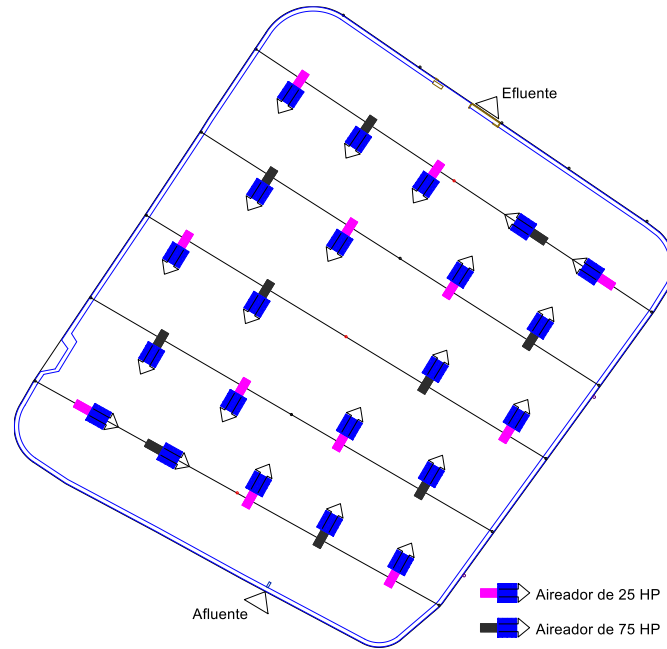


Figura 3.3-3. Disposición aireadores del Escenario 2. Fuente: autores.

- Escenario 3: En la Tabla 3.3-3 se muestran los aireadores encendidos y en la Figura 3.3-4 la disposición de los mismos.

Tabla 3.3-3. Escenario experimental 3.

Potencia aireadores	Aireadores encendidos	Potencia instalada (kW)
25 HP	Todos (12 en total)	447.60
75 HP	A1-6, A1-9, A1-14, A1-17	

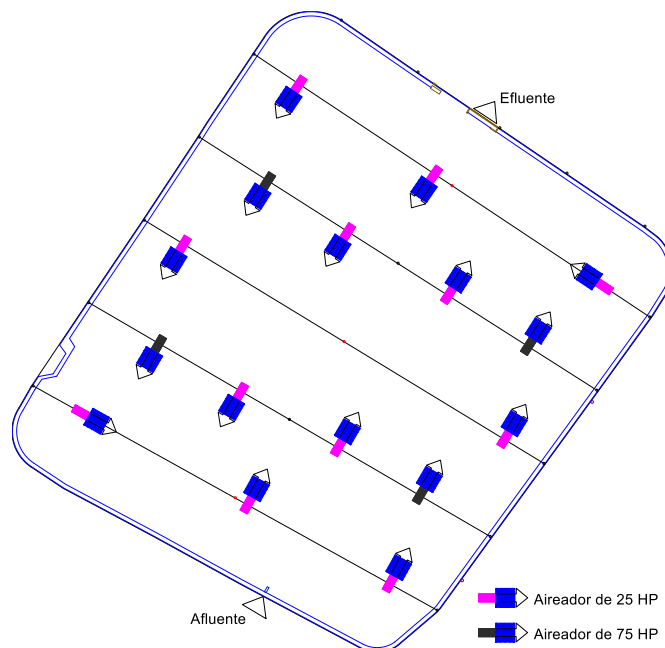


Figura 3.3-4. Disposición aireadores del Escenario 3. Fuente: autores.



- Escenario 4: En la Tabla 3.3-4 se muestran los aireadores encendidos y en la Figura 3.3-5 la disposición de los mismos.

Tabla 3.3-4. Escenario experimental 4.

Potencia aireadores	Aireadores encendidos	Potencia instalada (kW)
25 HP	Todos (12 en total)	223.80
75 HP	Ninguno	

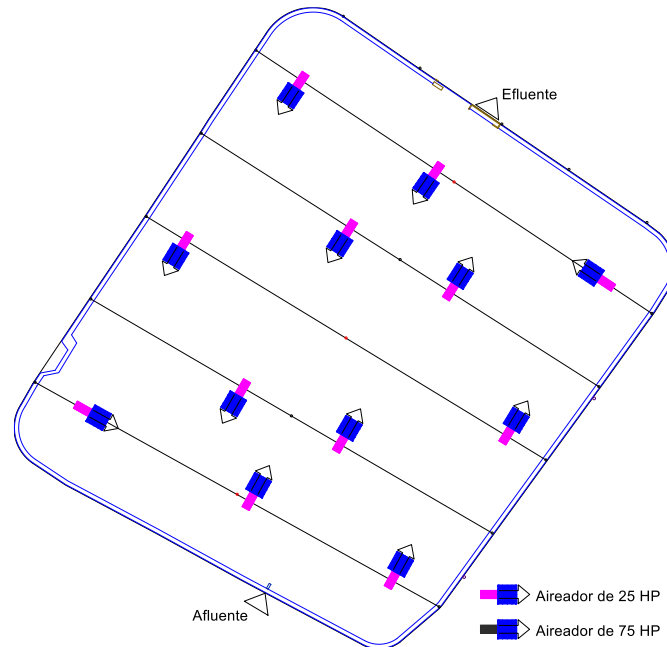


Figura 3.3-5. Disposición aireadores del Escenario 4. Fuente: autores.

3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS EXPERIMENTALES

Se describe a continuación el detalle del proceso experimental ejecutado en la laguna aireada #1 para capturar la distribución de oxígeno disuelto en los diferentes escenarios de experimentación.

3.4.1 MEDICIÓN DE OXÍGENO DISUELTO IN SITU

Consideraciones para las mediciones de OD:

- Para cada escenario se efectuaron mediciones de OD en 25 puntos, los cuales estuvieron distribuidos de forma homogénea en toda la laguna.
- Los 25 puntos estuvieron colocados de manera que en cada línea de aireadores (5 en total) se tuvieron 5 puntos.
- Los puntos fueron dispuestos a partir del poste central ubicado en cada línea de aireación, es así que se determinaron dos puntos a la derecha e izquierda de cada punto central (punto 3, 8, 13, 18 y 23) (ver Figura 3.4-1).
- Tales puntos estuvieron separados a una distancia de 35 m aproximadamente uno de otro (determinado a partir de Civil 3D).

- En cada punto se midió la concentración de OD a 0.25 m y a 1.00 m de profundidad del agua, lo cual fue decisión de la Jefatura de la PTAR como posible interferencia del lodo acumulado en el fondo de la laguna y para evitar la influencia del oxígeno atmosférico. Para ello, se colocaron marcas en el cable de la sonda.
- En todos los escenarios, las mediciones se efectuaron en el mismo sentido y orden a través de la laguna.
- Se realizaron mediciones de las concentraciones de OD en el desarenador al principio y al final de las mediciones en cada uno de los escenarios propuestos.

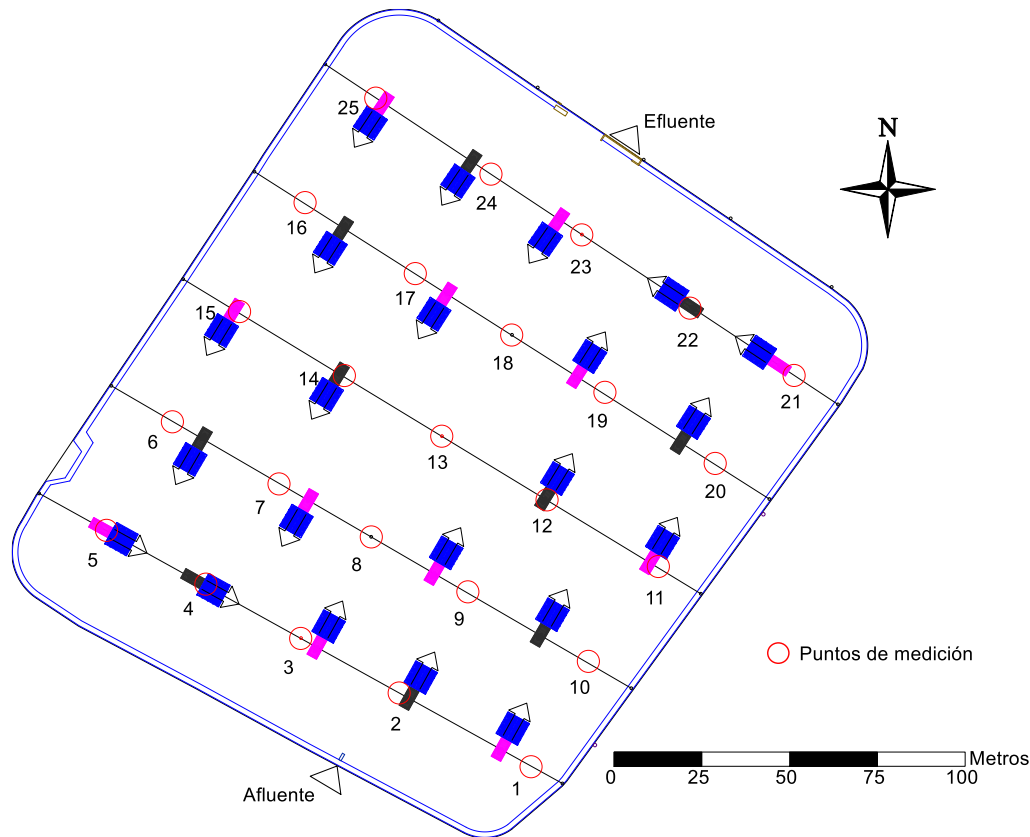


Figura 3.4-1. Distribución de puntos con el orden y sentido de las mediciones de OD. Fuente: autores.

Los materiales necesarios para efectuar las mediciones fueron los siguientes:

A) MATERIALES

- Bote con remos.
- Mascarilla.
- Guantes.
- Otros equipos de protección.
- Piseta.

B) EQUIPO

- Multiparámetro digital WTW 3420.

C) REACTIVOS

- Agua destilada.
- Sulfito de sodio (Na_2SO_3).

3.4.1.1 MULTIPARÁMETRO

Para las mediciones realizadas se utilizó un equipo Multiparámetro WTW 3420 (Alemania) (ver Figura 3.4-2). Dicho equipo viene equipado con sondas para mediciones en línea de pH, REDOX, conductividad y oxígeno disuelto.



Figura 3.4-2. Multiparámetro WTW 3420.

Para las mediciones de OD se utilizó el sensor IDS. A continuación en la Tabla 3.4-1 se observa las características de dicho sensor:

Tabla 3.4-1. Especificaciones sensor IDS para OD (akralab, 2012).

Descripción	Especificación
Modelo	FDO 925
Rango de medición de concentración	0.00 a 20.00 mg/l \pm 0.5 % del valor
Rango de medición de saturación	0.0 a 200 % \pm 0.5 % del valor
Rango de medición de presión parcial	0.0 a 400 mbar \pm 0.5 % del valor
Temperatura	0 a 50.0 °C \pm 0.2 °C
Forma de la membrana	Inclinada
Material del cuerpo	POM, acero inoxidable
Dimensiones del cuerpo	Longitud 140 mm \pm 1 mm, ϕ 15.3 mm \pm 0.2 mm
Longitud del cable	1.5 m

► FUNCIONAMIENTO

- Verificación que el equipo esté calibrado. Para este propósito se utilizó una disolución de 30 g de sulfito de sodio diluido en 300 ml de agua destilada para crear una lectura de cero “0” conforme el procedimiento de calibración del equipo suministrado por el fabricante. Se midió el OD durante un período de tiempo suficiente para obtener un valor menor o igual a 0.02 mg/l, conforme a la señal de verificación del cero en el equipo (WTW, 2015).



- Colocación del sensor digital de OD (Sensor IDS FDO 925, WTW, Alemania) (akralab, 2012) al Multiparámetro.
- Encendido del equipo.
- Para las mediciones de OD, el equipo presenta varias unidades de medición por lo que es necesario ajustar la configuración para obtener lecturas de OD en mg/l.
- Inmersión manual del sensor digital de OD a la profundidad de 0.25 o 1.00 m según sea el caso.
- Cuando la medición de OD se estabiliza (indicador de O₂ en la pantalla del equipo deja de titilar), el usuario guarda la medición de OD.
- Una vez finalizadas las mediciones en cada escenario, el sensor IDS se lava con agua destilada.

3.5 ERROR DE MEDICIÓN

Una vez realizadas las mediciones de OD en todos los escenarios, se determinó el error máximo existente, considerando el rango de concentraciones de oxígeno de los 4 escenarios. Para ello, se realizó una curva de calibración en la que relaciona la concentración de sulfito de sodio (g/l) versus la concentración de oxígeno disuelto (mg/l). Asimismo relaciona los valores medidos con los valores reales, para lo cual fue necesario conocer un patrón cuyos valores son conocidos.

Los materiales necesarios para efectuar tal análisis fueron los siguientes:

D) MATERIALES

- Balón volumétrico de 1 litro.
- Matraz de Erlenmeyer de 1 litro.
- Varilla de vidrio.
- Papel de pesaje.
- Piseta.

E) EQUIPO

- Multiparámetro digital WTW 3420.
- Balanza analítica.

F) REACTIVOS

- Agua destilada.
- Sulfito de sodio.

Se procedió con la siguiente metodología:

- Se calibró a saturación el Multiparámetro WTW 3420 según se indica en el manual del equipo (WTW, 2015):
 1. Conectar el sensor IDS de oxígeno al equipo.
 2. Saturar la esponja del recipiente de control, verificación y almacenamiento con agua destilada. Posteriormente, comprimir la misma de tal forma que esté húmeda pero no mojada. Finalmente, introducirla en el recipiente de control.
 3. Introducir el sensor en el recipiente de control y mantenerlo el tiempo suficiente para igualar su temperatura a temperatura ambiente.
 4. Iniciar la calibración con el botón CAL. Posteriormente, aceptar la calibración con el botón MENU/ENTER.



5. La calibración es satisfactoria, si el porcentaje de saturación es cercano al 100 % y la pendiente relativa se encuentra entre 0.94 a 1.06.
- Se determinó el tiempo de reacción del Na_2SO_3 en el agua destilada (1 g de Na_2SO_3 en 1 l de agua destilada). Según la norma NTE INEN-ISO 5814 (INEN, 2014) , se necesita 1 g o más de Na_2SO_3 en 1 l de agua para eliminar el oxígeno. Para ello, se midió automáticamente el OD cada 5 segundos mediante el Multiparámetro, hasta obtener valores constantes, lo que demuestra una estabilización de la reacción.
- Se prepararon 3 muestras con diferentes concentraciones de Na_2SO_3 . Cada una de dichas muestras estuvo formada por tres disoluciones estándar (ver Tabla 3.5-1). Para preparar y medir las concentraciones de las disoluciones se siguieron los pasos descritos a continuación:
 1. Pesar en la balanza analítica la cantidad de Na_2SO_3 que se necesite para preparar la disolución requerida.
 2. Medir en el balón volumétrico 1 litro de agua destilada para seguidamente trasladarla al matraz de Erlenmeyer.
 3. Preparar la disolución de Na_2SO_3 y agua destilada.
 4. Con la utilización de la varilla de vidrio, mezclar el sulfito de sodio en el agua destilada, durante 15 segundos aproximadamente.
 5. Mantener la disolución de forma hermética (mediante un corcho), durante un tiempo correspondiente al tiempo de reacción.
 6. Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se introduce la sonda en el matraz de Erlenmeyer para medir la concentración de OD.
 7. Se guarda las mediciones de OD cuando el indicador de O_2 deja de titilar.

Tabla 3.5-1. Disoluciones estándar de Na_2SO_3 y agua destilada.

Muestra	# de disoluciones estándar	Concentración de Na_2SO_3 (g/l)
1	3	0.10
2	3	0.20
3	3	0.25

- Estimación del error: a partir de los datos tomados en laboratorio, se procedió a realizar una estimación lineal por mínimos cuadrados, con un nivel de confianza del 95 % para obtener el error máximo.

3.6 ELABORACIÓN DE MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO

En la siguiente sección se describen los pasos realizados en el software Surfer 12 (Golden Software, USA) para la elaboración de los mapas de distribución de oxígeno disuelto para cada escenario:

- 1) Crear una hoja electrónica o un archivo de texto con los siguientes datos: coordenadas Norte, Este y el valor de oxígeno disuelto medido en cada punto de la laguna en columnas, dichos datos fueron exportados a partir de Civil 3D. Estos valores se guardan en un archivo de formato .dat.
- 2) Interpolación y extrapolación de datos en Surfer: se requiere una extrapolación de los datos para que el mapa contenga a todo el límite físico de la laguna. El usuario escoge el método de generación de la grilla, siendo el método *Kriging* el utilizado para



el presente estudio. El resultado es un archivo en formato .grd que contiene la interpolación/extrapolación.

Como se mencionó anteriormente, el método utilizado fue *Kriging* debido a que es un método de interpolación estocástico, exacto, global y localmente aplicable. Su principal objetivo consiste en establecer de forma precisa una ponderación óptima en un grupo de puntos (Olaya, 2011).

- 3) Crear un mapa de contorno formado por isolíneas. A partir del archivo .grd se crea un archivo de contornos o curvas de nivel, que en este caso representan líneas con un mismo valor de OD en la laguna.
- 4) Integrar las isolíneas a la geometría de la laguna: el contorno de la laguna se exportó desde el software Civil 3D a formato .dxf. Para este paso fue necesario ubicar puntos de referencia precisos tanto en la geometría como en el archivo de contornos o isolíneas de OD.
- 5) Dar un formato final al mapa: se recorta las líneas fuera de la geometría de la laguna.

3.7 CONSUMO ENERGÉTICO, GASTO ECONÓMICO Y CAPACIDAD DE AIREACIÓN

En el presente apartado se detallan las ecuaciones que se utilizaron para el cálculo del consumo energético, gasto económico y capacidad de aireación (ETAPA & TYPESA, 2004). A partir de dichos valores se pudo verificar el cumplimiento de los requerimientos energéticos y de oxígeno de la laguna aireada #1. Los valores referentes a las tarifas de costo eléctrico, correspondiente al sector industrial, fueron proporcionados por la Empresa Eléctrica Regional Centrosur C.A.

- Potencia instalada.

$$PI = a * PU \quad \text{Ecuación 3.7-1}$$

En donde:

PI = Potencia instalada de la laguna, kW.

a = Número de aireadores en funcionamiento.

PU = Potencia unitaria de los aireadores, kW.

- Densidad de energía.

$$DE = \frac{PI}{V_L} \quad \text{Ecuación 3.7-2}$$

En donde:

DE = Densidad de energía, W/m³.

V_L = Volumen de la laguna, m³.

- Consumo eléctrico.

$$CE = PI * t \quad \text{Ecuación 3.7-3}$$



En donde:

CE = Consumo eléctrico en un intervalo de tiempo, kW.h.

t = Tiempo de funcionamiento, h.

- Capacidad de aireación.

$$CA = CE_D * TO \quad \text{Ecuación 3.7-4}$$

En donde:

CA = Capacidad de aireación en condiciones estándar o de campo, kgO₂/día.

CE_D = Consumo eléctrico en 24 horas, kW.h.

TO = Transferencia de oxígeno en condiciones estándar o de campo, kgO₂/kW.h.

- Costo consumo eléctrico.

$$CO = T * CE \quad \text{Ecuación 3.7-5}$$

En donde:

CO = Costo consumo eléctrico en un intervalo de tiempo, \$.

T = tarifa horaria de costo eléctrico, \$/kW.h.

3.8 REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO Y ENERGÍA

A partir de la Ecuación 2.4-1 y la Ecuación 2.4-2 se estimó un requerimiento de oxígeno y de energía respectivamente, para posteriormente realizar una comparación con la capacidad de aireación y la potencia instalada de cada escenario. Se tuvieron las siguientes consideraciones descritas a continuación:

- El caudal del afluente y la DBO total que ingresan a la laguna aireada se determinó considerando los años 2013, 2014 y 2015. De la misma manera para la DBO soluble del efluente se consideró el mismo rango de años.
- Los demás valores que intervienen en las ecuaciones son valores intermedios, es decir, no se consideran valores conservadores ni perjudiciales.

3.9 ANÁLISIS DE PATRONES DE FLUJO EN LA LAGUNA CON TRAZADORES FLOTANTES.

Para este análisis se utilizaron 50 naranjas de tamaño similar entre ellas (determinado visualmente), las cuales fueron lanzadas para poder examinar el comportamiento de ellas dentro de la laguna de estudio. El uso de naranjas como trazadores flotantes es eficiente, ya que el 98 % de su volumen está sumergido evitando de esta manera el efecto del viento en la velocidad superficial del recorrido de las mismas (Bracho & Aldana, 2009). El proceso que se efectuó y el análisis que se determinó es el siguiente:

- En cada escenario se lanzaron las 50 naranjas en el canal de derivación, teniendo en cuenta la hora de inicio del lanzamiento para determinar los tiempos aproximados de viaje.



- Se determinó visualmente zonas de estancamiento en la laguna donde las naranjas se mantenían estáticas o con movimientos leves.
- La velocidad superficial se definió mediante la Ecuación 3.9-1:

$$V = e/t \quad \text{Ecuación 3.9-1}$$

En donde:

V = velocidad superficial, m/min.

e = distancia comprendida en dos líneas de aireadores, m.

t = tiempo que recorre la naranja en el espacio entre las dos líneas de aireadores, min.

- Se determinó visualmente un sentido de flujo preferencial en la laguna.
- Se calculó el tiempo de viaje de la primera naranja en salir de la laguna de estudio, relacionándolo con un cortocircuito presente. Para ello, se consideró la hora de lanzamiento de naranjas en el canal de derivación y la hora en la que la primera naranja sale de la laguna aireada por el vertedero con compuerta giratoria.

3.10 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA BÉNTICA

A partir de la Ecuación 2.4-4 se estimó la demanda béntica bajo diferentes valores de $o(0)$ y K_c . Según Chapra (2008), el modelo analítico propuesto para el cálculo de la SOD considera los siguientes aspectos:

1. La materia orgánica particulada se deposita en el fondo. Dicha capa sedimentada está formada por una capa anaerobia (inferior) y una delgada capa aerobia (superior). Dicha capa aerobia está ubicada en la interface agua-sedimento.
2. En la capa anaerobia se produce la descomposición de la materia carbonácea y del nitrógeno orgánico, formando de esta manera metano y amoníaco respectivamente.
3. El metano y el amoníaco que se formaron en la capa de sedimentos anaerobia ascienden hacia la capa de sedimentos aerobia. Si existe oxígeno en la capa superpuesta de agua, los gases se oxidarán en la capa de sedimentos aerobia,
4. La tasa de oxidación de los dos gases es más lenta que el tiempo de transporte de los mismos, es decir, una cierta cantidad de gas va a salir de la capa de sedimentos aerobia sin ser oxidada en ella.
5. El metano puede exceder la concentración de saturación en la capa anaerobia, formando burbujas que ascienden y escapan del sistema, llevándose parte de la materia orgánica. Por otro lado, no existe la formación de burbujas del amoníaco.

A partir de dicha función se puede calcular la SOD de forma iterativa hasta obtener una respuesta convergente. Para ello se utilizó la Ecuación 3.10-1, donde $\epsilon = 0.1$ y 'n' es el número de iteraciones (Chapra, 2008).

$$SOD_n = SOD_{n-1} - \frac{\epsilon SOD_{n-1} f(SOD_{n-1})}{f(SOD_{n-1} + \epsilon SOD_{n-1}) - f(SOD_{n-1})} \quad \text{Ecuación 3.10-1}$$



Finalmente, $SOD = SOD_{max}$ como primera aproximación (ver Ecuación 3.10-2):

$$SOD_{max} = \sqrt{2K_D C_S J_C} + r'_{on} a_{no} J_C \quad \text{Ecuación 3.10-2}$$

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente capítulo se presenta los resultados obtenidos a partir de los métodos y procedimientos descritos en el capítulo anterior. Específicamente, se analiza el comportamiento histórico de las cargas orgánicas y de sólidos, oxígeno disuelto y otros parámetros de calidad en la laguna de estudio; además, se analiza la distribución del oxígeno disuelto en cada escenario de operación, el gasto económico asociado y el cumplimiento de los requerimientos de energía y oxígeno. Por último, se analiza el comportamiento de las pruebas con trazadores flotantes y una estimación de la demanda béntica de oxígeno. Así también se plantean propuestas para un nuevo sistema de operación.

4.1 ANÁLISIS DE CARGAS ORGÁNICAS Y DE SÓLIDOS EN EL AFLUENTE DE LA PTAR

En la presente sección se detalla el comportamiento de las cargas orgánicas y de sólidos del afluente que ingresa a la PTAR. Los valores de los mismos se pueden observar en la Tabla A3-1.

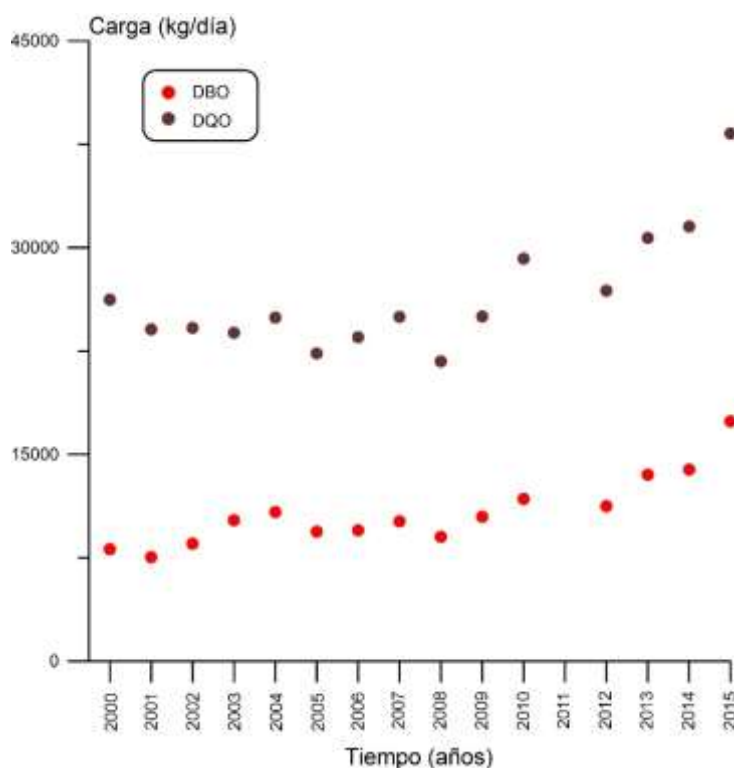


Figura 4.1-1. Cargas de DBO y DQO del afluente que ingresa a la PTAR.

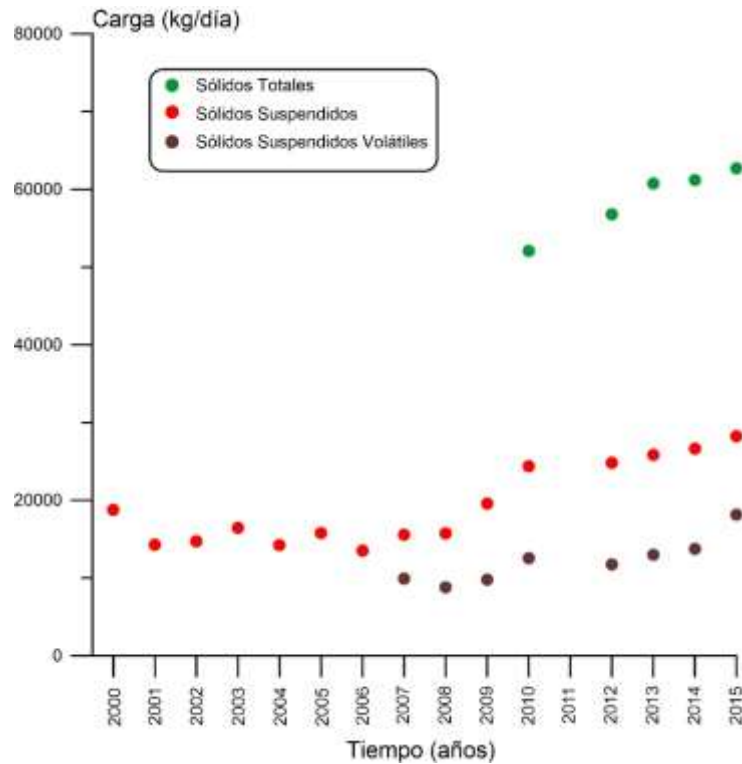


Figura 4.1-2. Cargas de ST, SS y SSV del afluente que ingresa a la PTAR.

1. Como se puede observar en la Figura 4.1-1 y Figura 4.1-2, las cargas de los parámetros analizados que ingresan a la PTAR mantienen un comportamiento similar entre ellas; es decir, las cargas han aumentado levemente con el tiempo, siendo más marcado los últimos 4 años. Este comportamiento es consecuencia del crecimiento de la población y la cobertura de la red de alcantarillado combinado de la ciudad.
2. Las cargas de los parámetros analizados (sólidos y contaminación orgánica) ocasionan un aumento directo del volumen de lodos acumulado en la laguna aireada; que, a su vez, produce una pérdida del volumen útil de la laguna. Un mayor caudal y una contracción del volumen útil representa una disminución del tiempo de residencia hidráulico en la laguna que afecta directamente a la eficiencia del tratamiento. Un mayor volumen de lodos, además ocasiona un aumento de la demanda béntica de oxígeno y deteriora aún más el tratamiento de la laguna si la acumulación se produce en forma no uniforme, fomentando los cortocircuitos.
3. Se puede observar que las cargas en el año 2015 son significativamente mayores, sin embargo no ha sido determinada la causa de dicho evento por parte de la Jefatura de la PTAR.

4.2 ANÁLISIS HISTÓRICO DE PARÁMETROS DE CALIDAD

Los parámetros de calidad DBO_5 , DQO, SS y SSV son analizados mensualmente tanto en el afluente como en el efluente de la laguna de estudio, durante los años 2013, 2014 y 2015.



► AFLUENTE

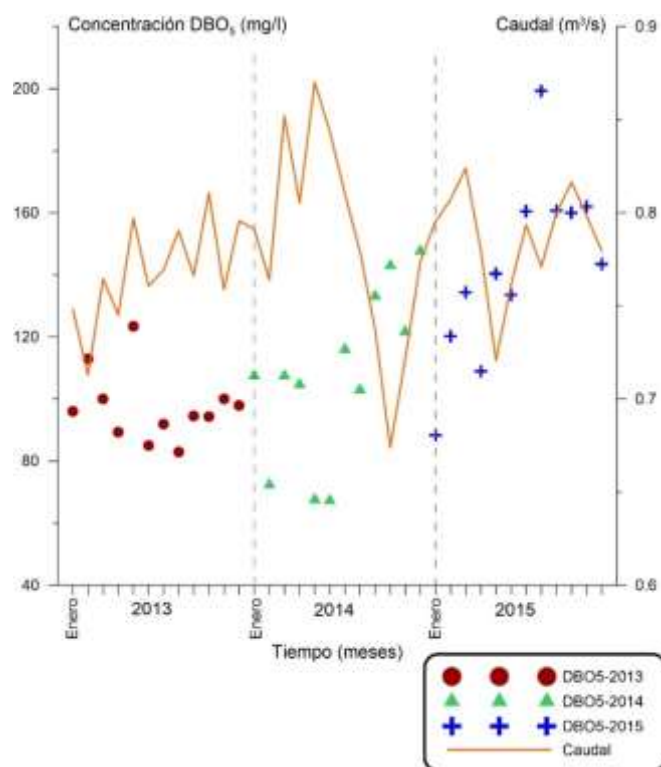
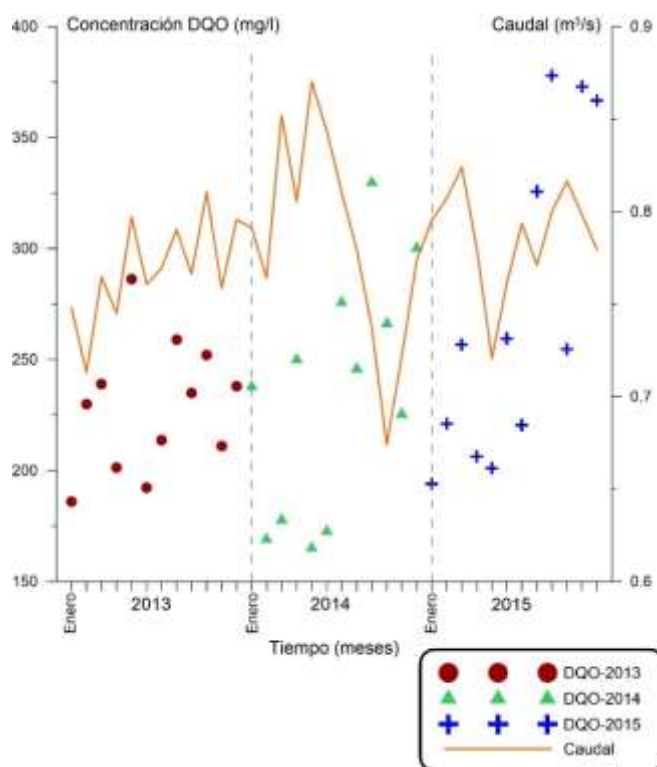
Figura 4.2-1. DBO₅ en afluente.

Figura 4.2-2. DQO en afluente.



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

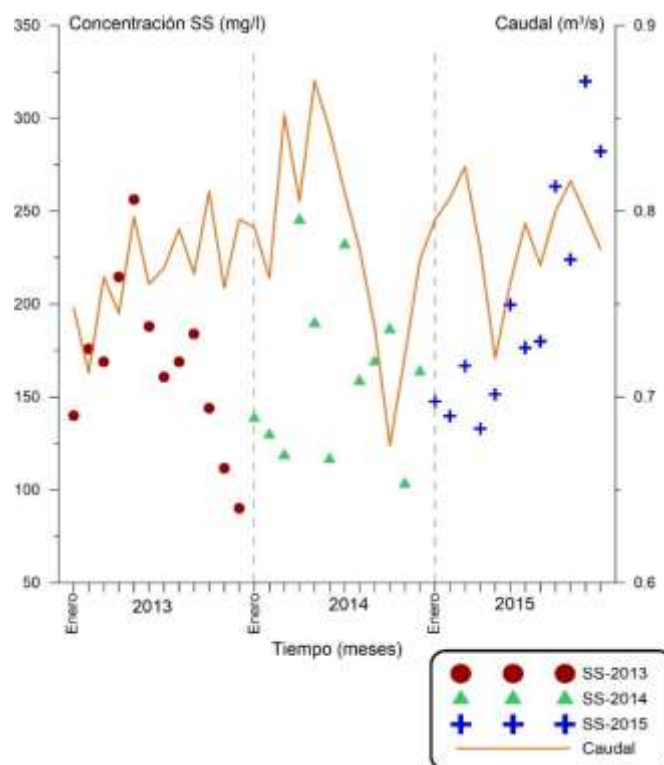


Figura 4.2-3. SS en afluente.

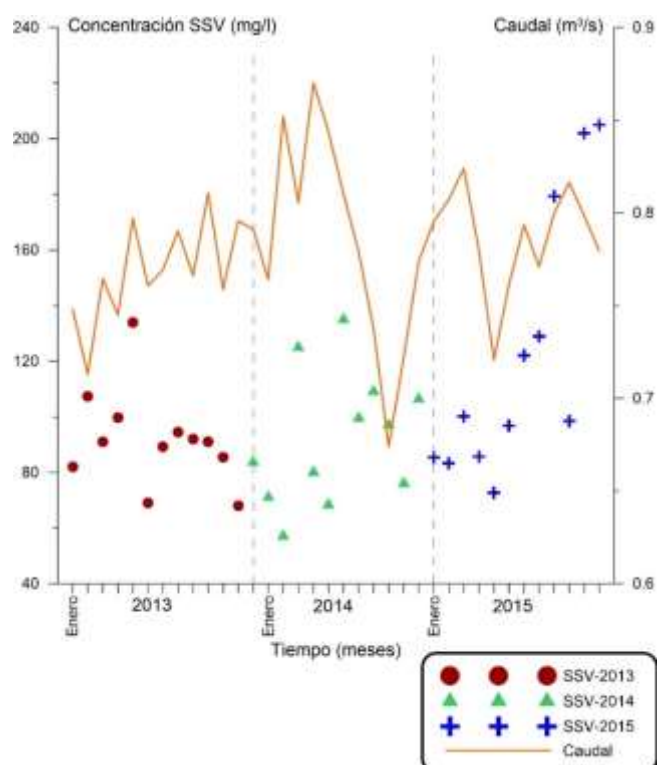


Figura 4.2-4. SSV en afluente.



► EFLUENTE

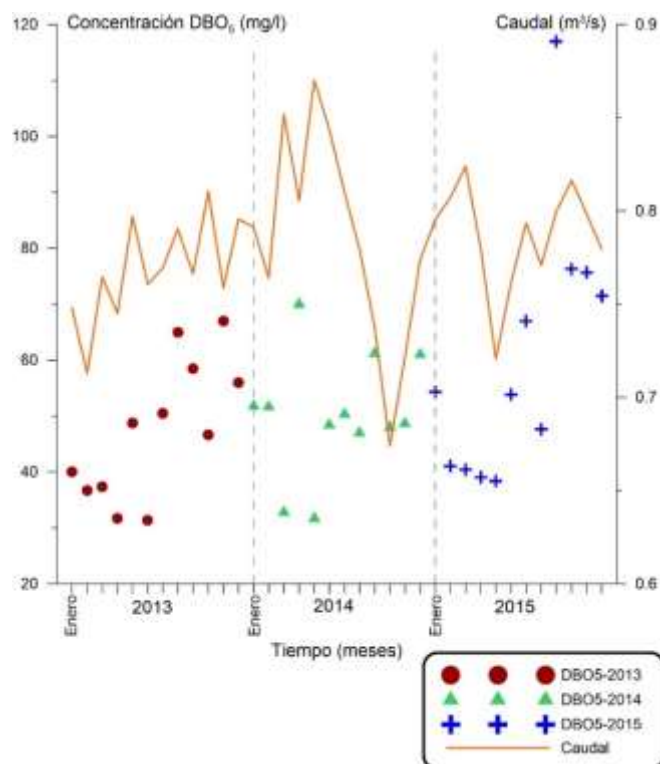


Figura 4.2-5. DBO₅ en efluente.

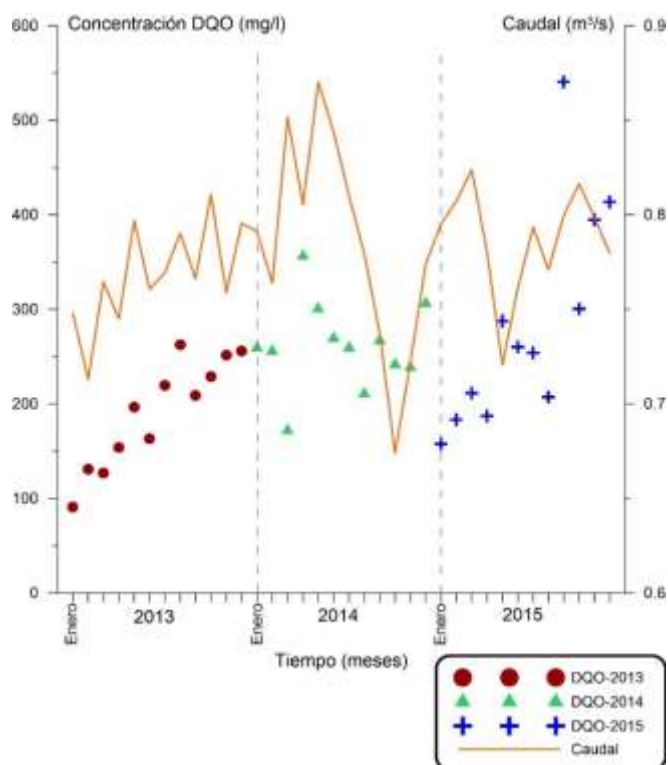


Figura 4.2-6. DQO en efluente.



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

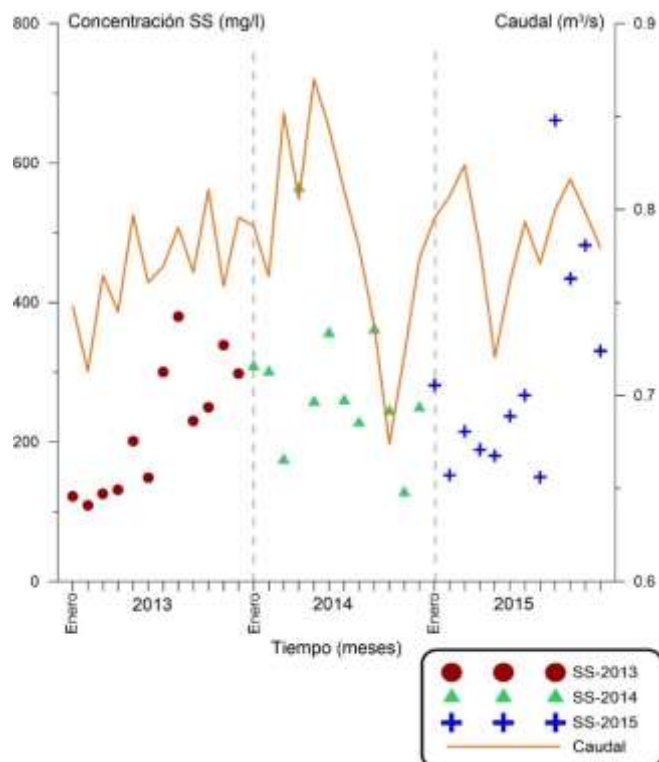


Figura 4.2-7. SS en efluente.

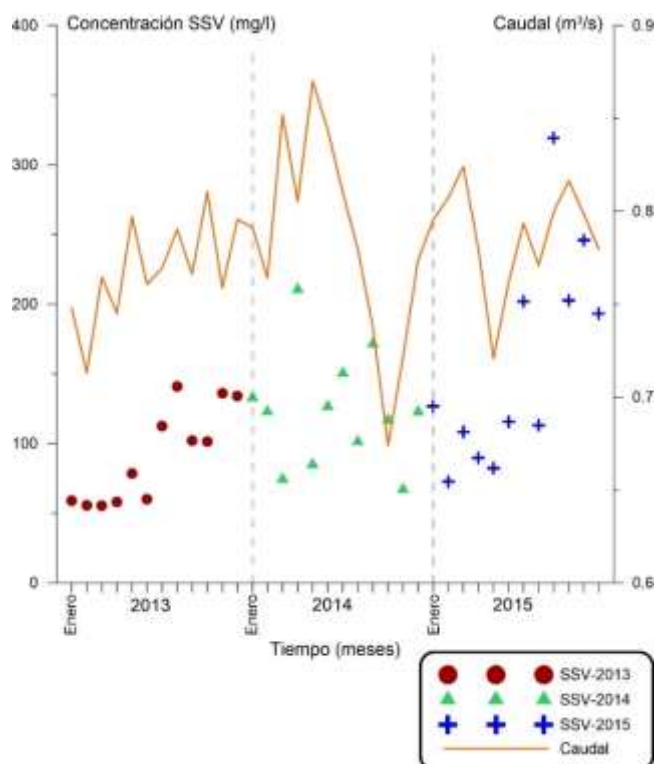


Figura 4.2-8. SSV en efluente.

1. Se observa en la Figura 4.2-1, que la concentración orgánica en términos de DBO_5 que ingresa en la PTAR y consecuentemente en la laguna aireada, tiene una tendencia



- incremental en los últimos 3 años; sin embargo, existe una alta variabilidad de los datos que puede explicarse por la dilución del agua residual en el sistema combinado.
- Respecto a la eficiencia de remoción de DBO total en la laguna aireada, los promedios mensuales, que a pesar de una ligera tendencia incremental, no es concluyente en vista de la alta variabilidad de los datos (ver Figura 4.2-1 y Figura 4.2-5). El promedio de remoción en la laguna aireada, por encima del 50% es positivo y acorde a un sistema de funcionamiento adecuado según la literatura.

Tabla 4.2-1. Remoción en porcentaje de DBO₅ en la laguna aireada.

Mes	Año		
	2013	2014	2015
Enero	58.33	51.82	38.49
Febrero	67.55	28.57	65.90
Marzo	62.67	69.53	69.94
Abril	64.55	33.12	64.22
Mayo	60.53	53.09	72.68
Junio	63.14	27.98	59.73
Julio	45.11	56.61	58.26
Agosto	21.69	54.37	76.09
Septiembre	38.10	54.05	27.18
Octubre	50.53	66.43	52.29
Noviembre	33.00	60.00	53.29
Diciembre	42.86	58.69	50.17
	<i>Media</i>		
	50.67	51.19	57.35

En la Tabla 4.2-1 se evidencia que a partir del año 2013 en el cual se implementaron los 12 aireadores de 25 HP, el porcentaje de remoción no ha variado significativamente. Sin embargo, es importante considerar que el volumen de lodo acumulado en todo el sistema y en particular en las lagunas aireadas, ha ido incrementándose, con la consiguiente reducción del volumen útil de la laguna y el tiempo de retención hidráulico. Este último parámetro es afectado aún más en los últimos años debido al incremento del caudal tratado en el sistema gracias al crecimiento de la red de alcantarillado de la ciudad.

- En términos de DQO se puede observar en la Figura 4.2-2 y Figura 4.2-6 que existe una gran variabilidad de datos, por lo que no se puede visualizar una determinada tendencia.
- En términos de SS y SSV (ver Figura 4.2-3, Figura 4.2-4, Figura 4.2-7 y Figura 4.2-8) no es posible visualizar tendencias o variaciones concluyentes debido a que el incremento de aireadores en la laguna, ha aumentado también la energía para mantener en suspensión una mayor cantidad de sólidos que necesariamente ha incrementado la concentración de los mismos en el efluente de la laguna (mayor a lo recomendado por la literatura) (ver Tabla A4-1, Tabla A4-2 y Tabla A4-3).



4.3 ANÁLISIS HISTÓRICO DEL OXÍGENO DISUELTO

En el siguiente apartado se analiza el comportamiento horario del OD medido en línea en un solo punto de la laguna versus la potencia total de aireación suministrada. El OD presente corresponde a las mediciones por parte del sensor. La potencia corresponde a la suma de los aireadores encendidos en cada configuración como se indica en la Tabla 3.3-1, Tabla 3.3-2, Tabla 3.3-3 y Tabla 3.3-4. El periodo de análisis es 24 horas. Se observa en la Tabla 3.3-1 las tres configuraciones de aireación utilizados durante el escenario de mayor utilización en las lagunas aireadas de Ucubamba.

► PATRÓN DEL OD EN LA LAGUNA

En la Figura 4.3-1 se muestra el comportamiento del oxígeno a lo largo de tres días seguidos y en la Tabla 4.3-1 se muestra un análisis del patrón observado en los días analizados. En la Figura A5-1 y Figura A5-2 se puede observar tal patrón a lo largo de varios días.

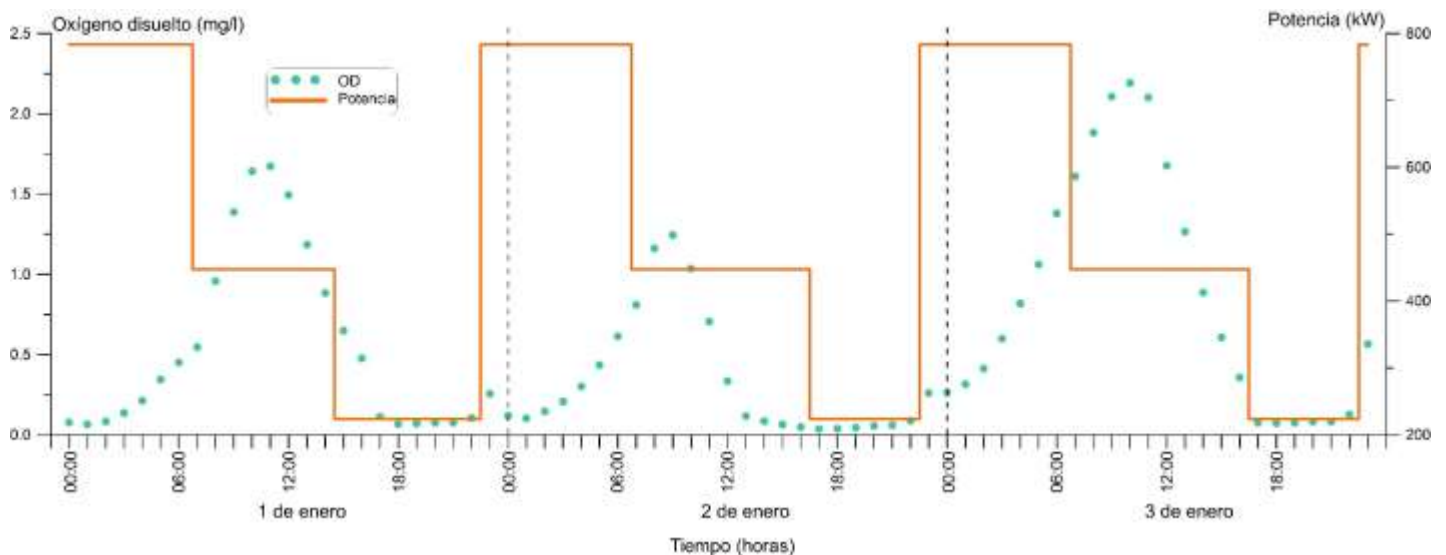


Figura 4.3-1. Oxígeno disuelto versus potencia total de aireación (1, 2 y 3 de enero).

Tabla 4.3-1. Análisis horario del OD.

Fecha	Concentración máxima de OD		Ascenso del OD	Concentraciones bajas de OD	
	Hora	Valor (mg/l)		Intervalo horario	
01-ene-16	11:00	1.67	2:00	17:00	2:00
02-ene-16	9:00	1.24	2:00	13:00	1:00
03-ene-16	10:00	2.19	2:00	17:00	1:00
06-ene-16	6:00	0.2		13:00	22:00
07-ene-16	8:00	0.19	2:00	13:00	23:00
08-ene-16	8:00	0.1	2:00	13:00	18:00
12-ene-16	10:00	0.14	2:00	15:00	18:00
13-ene-16	8:00	0.29	3:00	13:00	15:00
14-ene-16	8:00	0.49	2:00	13:00	21:00
15-ene-16	9:00	0.09	4:00	15:00	18:00
16-ene-16	9:00	0.15	2:00	12:00	19:00
17-ene-16	9:00	0.95	2:00	17:00	22:00



18-ene-16	7:00	1.25	2:00	13:00	22:00
19-ene-16	7:00	0.22	2:00	12:00	18:00
26-ene-16	6:00	0.32	2:00	13:00	21:00
27-ene-16	6:00	0.23	2:00	13:00	21:00
28-ene-16	8:00	0.53	2:00	13:00	23:00
29-ene-16	8:00	0.08	2:00	12:00	22:00

Por lo tanto el comportamiento del OD en la laguna aireada se resume de la siguiente manera:

1. El comportamiento horario del OD se ve directamente influenciado por la operación diaria de los aireadores en la laguna, pues en 24 horas se utilizan tres configuraciones de aireación, que implican el encendido y el apagado de los aireadores con cambios significativos en la potencia instalada (ver Tabla 3.3-1).
2. El máximo de OD no corresponde con el máximo de potencia; es decir, el efecto de los escenarios de aireación, que es utilizado actualmente por la PTAR, aparece con un desfase temporal en la respuesta de OD en la laguna.
3. El desfase ocurre hasta llegar al máximo de OD, de tal forma que tarda unas horas reflejar en OD la potencia de aireación suministrada. Dicho desfase se ve reflejado en:
A las 2h00 el OD empieza a aumentar de forma gradual hasta las 9h00 aproximadamente, debido al oxígeno introducido por todos los aireadores que se encendieron a las 22h30.
A las 6h45 se apagan 6 aireadores de 75 HP, iniciando de esta forma con el siguiente escenario. En horas posteriores, se da un ascenso hasta alcanzar la máxima concentración de OD. Posteriormente, empieza a descender como consecuencia de su consumo.
4. Es destacable observar que cuando se apagan todos los aireadores de 75 HP, la respuesta en los niveles de OD es casi inmediata. Es así que, el consumo de OD es mucho más rápido que la recuperación de los niveles de OD por los aireadores.
5. En la Tabla 4.3-1 existe un día con una concentración máxima >2 mg/l, lo cual está por encima de lo esperado para una laguna aireada facultativa en condiciones normales de operación; sin embargo, este fenómeno no vuelve a repetirse ningún otro día, manteniéndose por debajo de 0.5 mg/l. Las posibles causas de aquello pudieron ser una descalibración del sensor o un exceso de aireación.
6. El OD llega casi a 0 en algún punto del día todos los días, por lo que las condiciones de la laguna pasan de aeróbicas a posiblemente anóxicas y regresan a aeróbicas durante el mismo día, esto es perjudicial para la biomasa de la laguna, que tiene que adaptarse a condiciones extremas durante un mismo día.
7. Generalmente existe un ascenso a las 23h00 en la concentración de OD en un intervalo de tiempo corto, posiblemente como consecuencia del inicio del encendido de todos los aireadores (22h30) y por ende, de la mayor potencia instalada.
8. Por otra parte, en el intervalo horario de 23h00 – 2h00 existe una disminución gradual en la OD, debido a que el mismo es rápidamente consumido para oxidar aeróbicamente la materia orgánica y otra parte es demandada por el SOD debido a que los sedimentos depositados en el fondo de la laguna son abruptamente puestos en suspensión.



9. El intervalo de valores bajos de OD muestra que la potencia suministrada durante la configuración de menor aireación, no satisface las necesidades de oxígeno para estabilizar la materia orgánica en condiciones aerobias. Bajo este escenario de operación, la degradación anaerobia de la materia orgánica juega un papel clave en la eficiencia global de remoción del sistema.

4.4 ERROR DE MEDICIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la estimación del error máximo que existe en las mediciones de OD. En la Tabla 4.4-1 se observan los valores obtenidos en la calibración del equipo:

Tabla 4.4-1. Resultados de calibración del Multiparámetro WTW 3420.

Parámetro	Resultado
Pendiente relativa	1.04
Porcentaje de saturación (%)	100.40
Concentración de OD (mg/l)	6.40

El tiempo de reacción de la disolución fue de 17 minutos y 5 segundos (ver Tabla A8-1). El comportamiento de estabilización de la reacción se puede observar en la Figura 4.4-1.

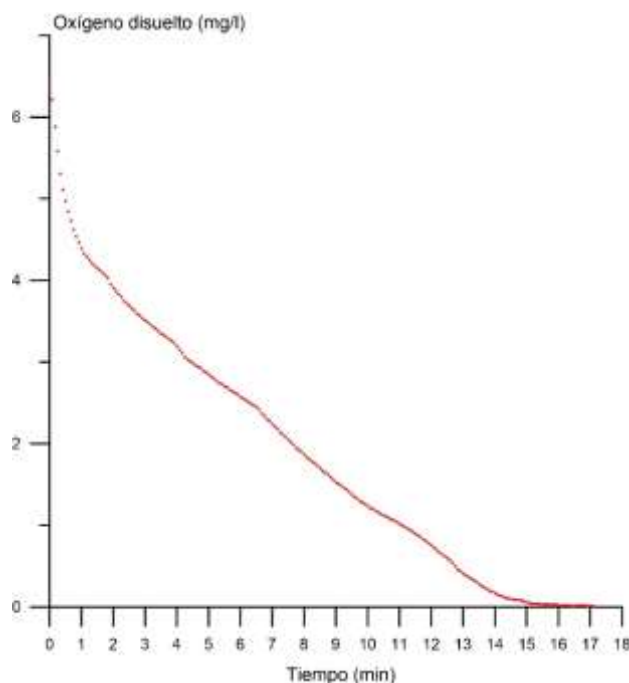


Figura 4.4-1. Tiempo de reacción de la disolución Na_2SO_3 y agua destilada.

En la Tabla 4.4-2, se muestran las concentraciones de OD que se obtuvieron en el laboratorio bajo diferentes concentraciones de sulfito de sodio:



Tabla 4.4-2. Concentración de OD en las disoluciones.

Muestra	Concentración de Na ₂ SO ₃ (g/l)	Disolución estándar (#)	Concentración de OD (mg/l)
Muestra 1	0.10	1	3.61
		2	3.51
		3	3.27
Muestra 2	0.20	1	1.03
		2	1.19
		3	1.33
Muestra 3	0.25	1	0.08
		2	0.10
		3	0.12

Por último, en la Figura 4.4-2 se muestra la distribución de las disoluciones estándar. A partir de dichas disoluciones, se tiene un ajuste lineal por mínimos cuadrados con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9938. Por lo que, la precisión o el error máximo que existe en el rango de mediciones de los 4 escenarios, con un intervalo de confianza del 95 %, es de ± 0.13 mg/l.

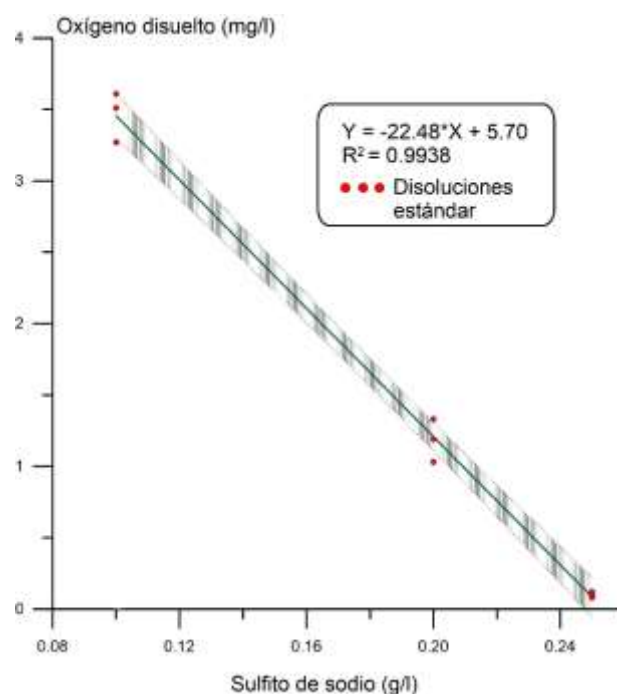


Figura 4.4-2. Curva de calibración.

4.5 ANÁLISIS DE LOS MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO DISUELTO

En el siguiente apartado se muestra el resultado de los análisis de la distribución de oxígeno disuelto obtenidos en campo en cada uno de los cuatro escenarios de aireación utilizados. Se observa en los mapas, isolíneas de OD y los 25 puntos donde fueron tomados los datos de campo (en rojo). La escala de colores de los mapas posee intervalos naturales, debido al cambio brusco en el comportamiento de los datos.



Por otro lado, las mediciones de OD realizadas en el desarenador se muestran en la Tabla 4.5-1.

Tabla 4.5-1. Mediciones de OD en el desarenador.

Escenarios	OD en el desarenador (mg/l)	
	Inicio de la medición	Final de la medición
Escenario #1	2.76	2.55
Escenario #2	2.73	3.20
Escenario #3	3.40	3.29
Escenario #4	4.48	4.40

ESCENARIO 1

El Escenario 1 posee tres configuraciones de encendido y apagado durante 24 horas, como se puede observar en la Tabla 3.3-1. Como se mencionó anteriormente, éste es el escenario actualmente utilizado por la Jefatura.

Las mediciones se efectuaron el día nueve de septiembre del 2016, a partir de las 10h21 hasta las 15h04. En la Tabla 4.5-2 se observa las concentraciones de OD a 0.25 m y 1.00 m de profundidad y el error en cada uno de los puntos.

Tabla 4.5-2. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 1. Error de medición: ± 0.13 mg/l.

Puntos	OD a 0.25 m (mg/l)	OD a 1.00 m (mg/l)
1	0.02	0.01
2	0.03	0.02
3	0.05	0.02
4	0.02	0.01
5	0.02	0.02
6	0.02	0.01
7	0.02	0.01
8	0.03	0.02
9	0.03	0.03
10	0.19	0.10
11	0.07	0.05
12	0.04	0.01
13	0.02	0.02
14	0.03	0.01
15	0.09	0.08
16	0.12	0.08
17	0.02	0.02
18	0.02	0.02
19	0.03	0.02
20	0.03	0.01
21	0.03	0.02
22	0.03	0.03



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

23	0.04	0.02
24	0.03	0.02
25	0.04	0.02

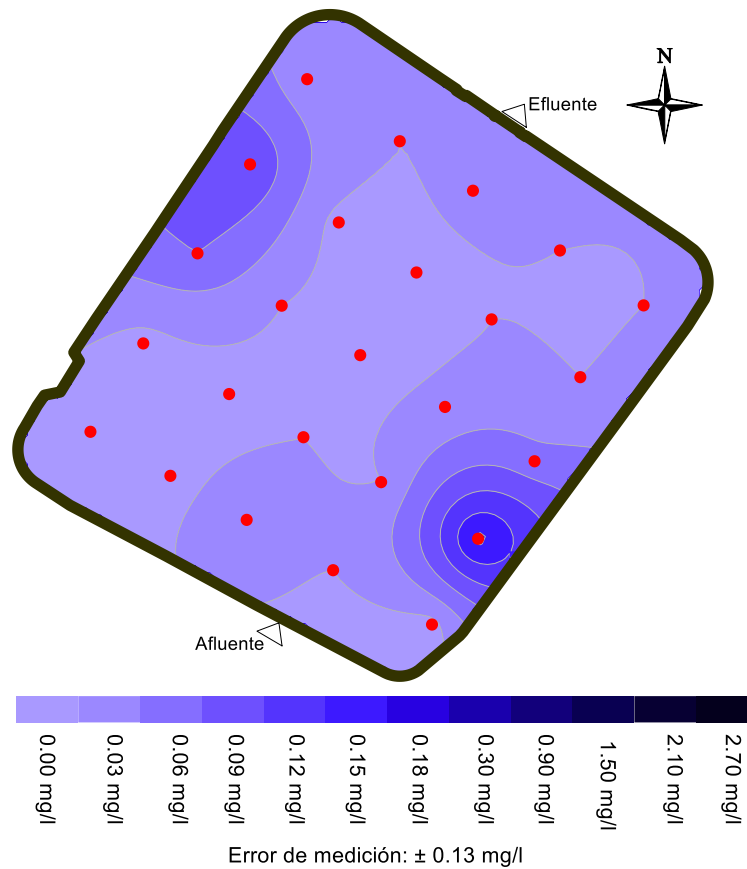


Figura 4.5-1. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 1 a 0.25 m de profundidad.

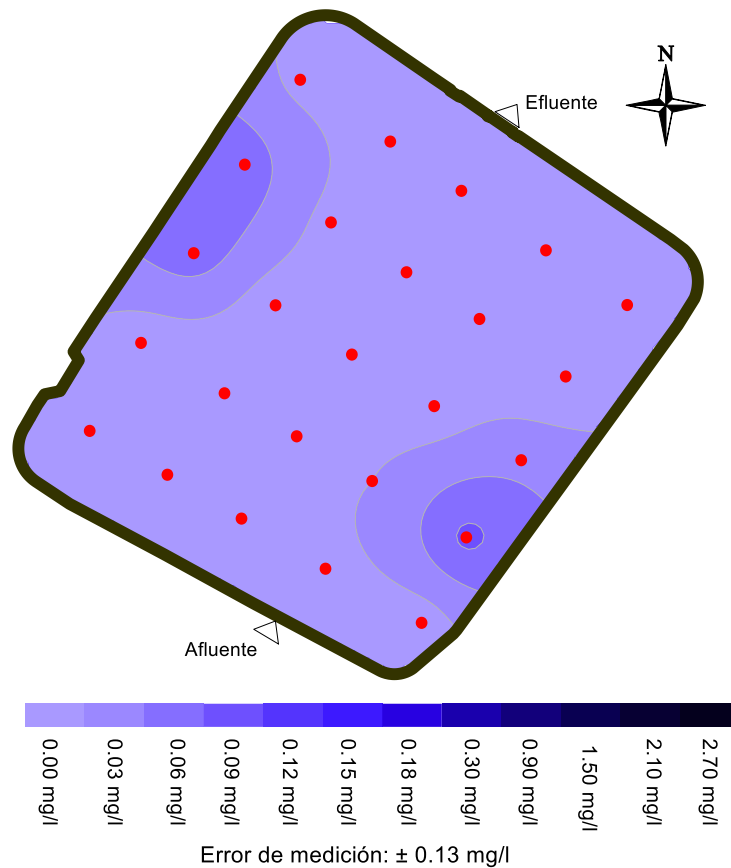


Figura 4.5-2. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 1 a 1.00 m de profundidad.

► ESCENARIO 2

Las mediciones se efectuaron el día 26 de septiembre del 2016, a partir de las 8h40 hasta las 13h10. En la Tabla 4.5-3 se observa las concentraciones de OD a 0.25 m y 1.00 m de profundidad y el error en cada uno de los puntos.

Por decisión de la Jefatura de Ucubamba, tal escenario se mantuvo en operación seguida ocho días antes de realizar las mediciones.

Tabla 4.5-3. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 2. Error de medición: ± 0.13 mg/l.

Puntos	OD a 0.25 m (mg/l)	OD a 1.00 m (mg/l)
1	3.24	3.15
2	2.74	2.94
3	2.62	2.67
4	2.77	2.76
5	2.80	2.76
6	2.70	2.68
7	2.51	2.36
8	2.28	2.23
9	2.33	2.17



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

10	2.65	2.55
11	2.41	2.48
12	2.43	2.37
13	2.38	2.35
14	2.28	2.16
15	2.48	2.41
16	2.51	2.47
17	2.30	2.32
18	2.22	2.23
19	2.36	2.25
20	2.19	2.10
21	2.19	2.07
22	2.22	2.13
23	2.28	2.24
24	2.02	2.00
25	1.82	1.64

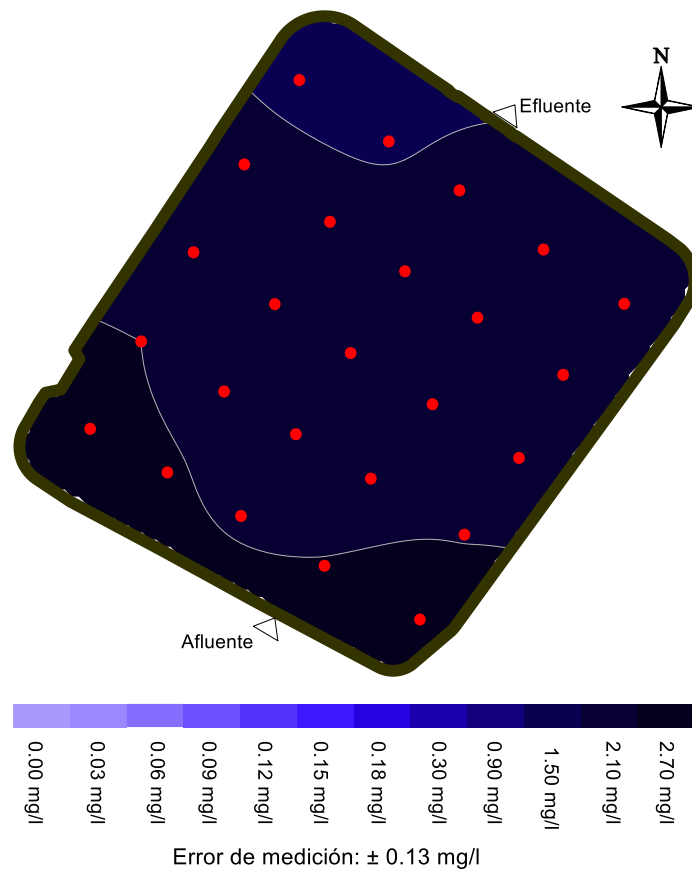


Figura 4.5-3. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 2 a 0.25 m de profundidad.

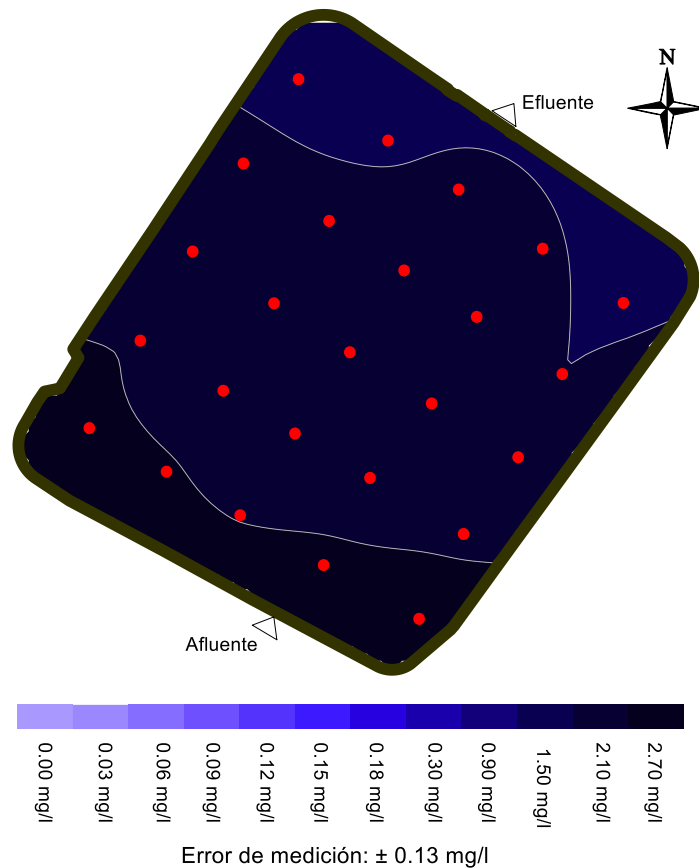


Figura 4.5-4. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 2 a 1.00 m de profundidad.

► ESCENARIO 3

Las mediciones se efectuaron el día 3 de octubre del 2016, a partir de las 8h50 hasta las 14h13. En la Tabla 4.5-4 se observa las concentraciones de OD a 0.25 m y 1.00 m de profundidad y el error en cada uno de los puntos.

Por decisión de la Jefatura de Ucubamba, tal escenario se mantuvo en operación seguida siete días antes de realizar las mediciones.

Tabla 4.5-4. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 3. Error de medición: ± 0.13 mg/l.

Puntos	OD (mg/l) a 0.25 m	OD (mg/l) a 1.00 m
1	2.41	2.08
2	1.70	1.69
3	1.85	1.83
4	1.53	1.47
5	1.38	1.19
6	1.35	1.31
7	0.72	0.74
8	0.65	0.58
9	0.65	0.60

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

10	0.76	0.78
11	0.67	0.50
12	0.24	0.15
13	0.07	0.06
14	0.05	0.02
15	0.31	0.25
16	0.26	0.20
17	0.02	0.01
18	0.20	0.15
19	0.04	0.05
20	0.35	0.27
21	0.05	0.01
22	0.12	0.14
23	0.04	0.02
24	0.03	0.02
25	0.04	0.04

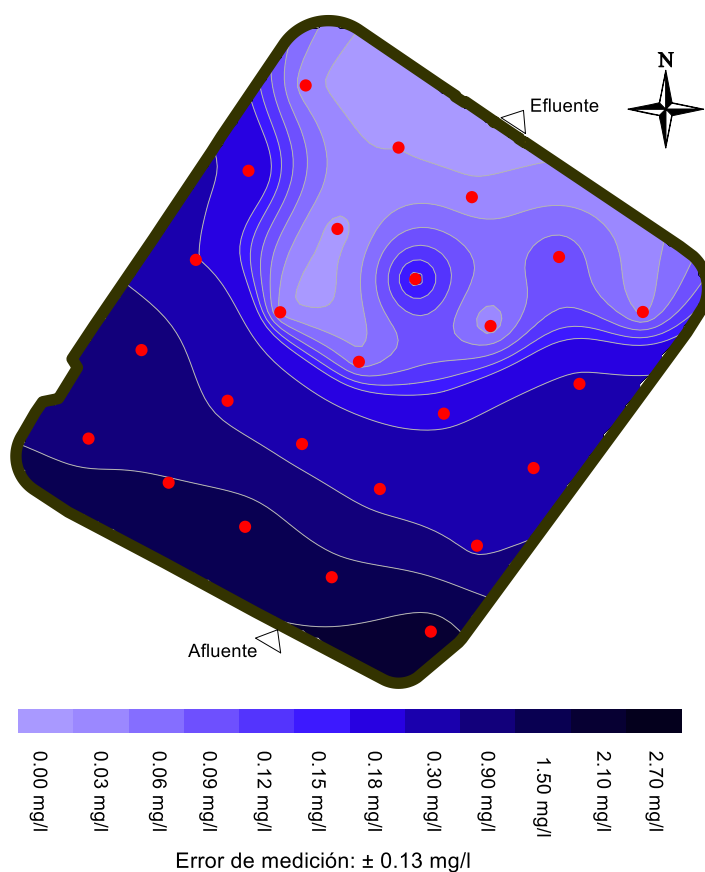


Figura 4.5-5. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 3 a 0.25 m de profundidad.

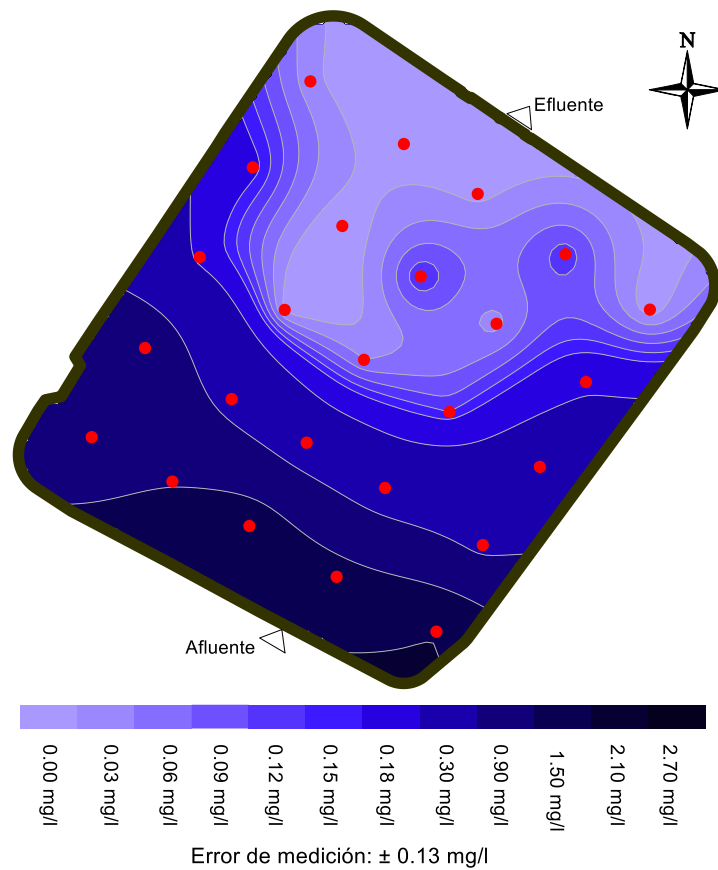


Figura 4.5-6. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 3 a 1.00 m de profundidad.

► ESCENARIO 4

Las mediciones se efectuaron el día 13 de octubre del 2016, a partir de las 10h30 hasta las 15h45. En la Tabla 4.5-5 se observa las concentraciones de OD a 0.25 m y 1.00 m de profundidad y el error en cada uno de los puntos.

Por decisión de la Jefatura de Ucubamba, tal escenario se mantuvo en operación seguida ocho días antes de realizar las mediciones.

Tabla 4.5-5. Valores de oxígeno disuelto y temperatura a 0.25 y 1.00 m de profundidad en el Escenario 4. Error de medición: ± 0.13 mg/l.

Puntos	OD a 0.25 m (mg/l)	OD a 1.00 m (mg/l)
1	0.04	0.06
2	0.04	0.01
3	0.02	0.02
4	0.03	0.02
5	0.03	0.02
6	0.02	0.02
7	0.02	0.02
8	0.03	0.01
9	0.02	0.01



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

10	0.24	0.15
11	0.13	0.12
12	0.03	0.01
13	0.04	0.03
14	0.03	0.02
15	0.05	0.02
16	0.03	0.02
17	0.02	0.01
18	0.02	0.02
19	0.02	0.01
20	0.03	0.01
21	0.02	0.01
22	0.07	0.02
23	0.01	0.01
24	0.02	0.02
25	0.02	0.01

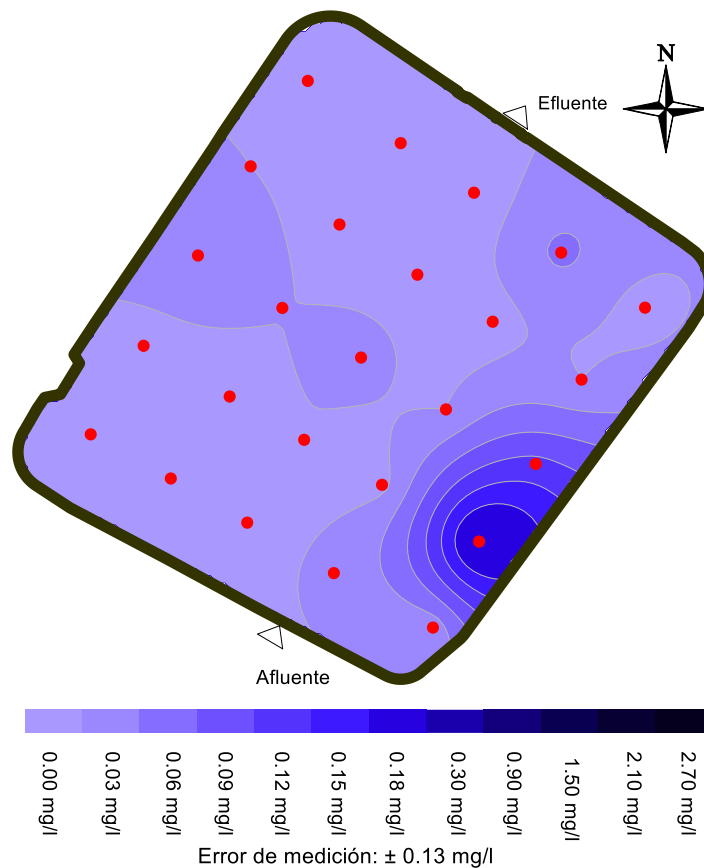


Figura 4.5-7. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 4 a 0.25 m de profundidad.

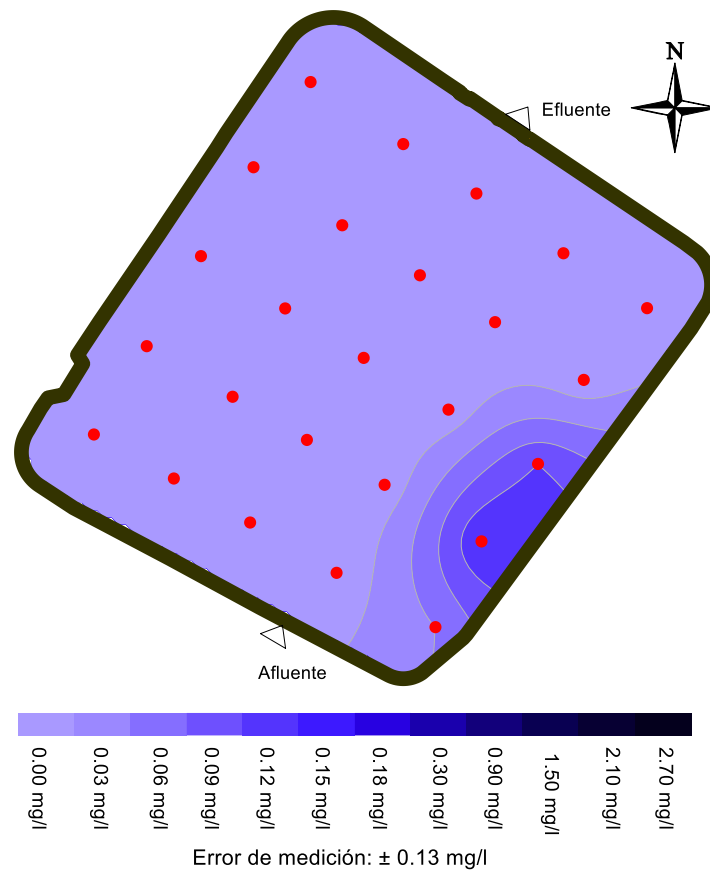


Figura 4.5-8. Mapa de distribución de oxígeno disuelto del Escenario 4 a 1.00 m de profundidad.

1. Se puede observar que en cada uno de los escenarios, no existen diferencias significativas en la concentración de OD a 0.25 m y a 1.00 m de profundidad, lo que indica que se produce una buena mezcla vertical (en el rango de medición).
2. En todos los escenarios existen valores máximos de concentración de OD entre los puntos 1 y 10, posiblemente como consecuencia de la turbulencia del flujo cuando ingresa a la laguna y a un nivel relativamente alto de OD del afluente.
3. En el Escenario 1 gran parte de la laguna posee valores de concentración de OD cercanos a 0 tanto a 0.25 como a 1.00 m de profundidad (ver Figura 4.5-1 y Figura 4.5-2). En el punto 10, a 0.25 m se da un valor pico de 0.19 mg/l y a 1.00 m de 0.10 mg/l. Evidentemente, los niveles de OD son deficientes en toda la laguna, existiendo una posible condición anóxica.

En el punto 16 existe un valor atípico de concentración de OD (0.12 mg/l) a una profundidad de 0.25 m; es muy importante señalar que la medición in situ de OD se llevó a cabo en horas de la mañana, cuando se encontraba en operación la configuración con una potencia instalada correspondiente al intervalo horario de 6h45 – 16h30 (ver Tabla 3.3-1), lo cual puede ser causa de dicha concentración, pues en tal punto existe un aireador cercano de 75 HP encendido que podría haber influenciado un flujo preferencial con una alta concentración puntual y momentánea de OD.

4. En el Escenario 2 existen valores altos en la concentración de OD en toda la laguna como consecuencia del encendido de todos los aireadores (ver Figura 4.5-3 y Figura



- 4.5-4) ; sin embargo, se puede observar que existe un descenso de esta concentración desde la entrada hasta la salida, debido a que el afluente de la laguna posee una concentración de OD importante (ver Tabla 4.5-1) y ésta va disminuyendo en la misma por el régimen de dispersión. El valor máximo es de 3.24 mg/l (punto 1) a 0.25 m de profundidad, mientras que a 1.00 m es de 3.15 mg/l en el mismo punto.
5. El comportamiento en el Escenario 3 es similar al Escenario 2, es decir existe un descenso desde la entrada hasta la salida. Se puede observar que hay una concentración máxima de 2.41 mg/l a 0.25 m de profundidad (punto 1) y a 1.00 m de 2.08 mg/l (mismo punto) (ver Figura 4.5-5 y Figura 4.5-6). Aproximadamente el 50% de la laguna tiene una concentración de OD cercana a 0, de tal forma se propicia al desarrollo de condiciones anóxicas o inclusive anaeróbicas muy cercanas a la superficie.
 6. En el Escenario 4, en su mayoría los valores de OD son cercanos a 0 (ver Figura 4.5-7 y Figura 4.5-8), formándose muy posiblemente condiciones anóxicas. De la misma manera que en el Escenario 1, en el punto 10 a 0.25 y 1.00 m se tiene el máximo valor de OD (0.24 y 0.15 mg/l respectivamente).
 7. Se destaca finalmente como una observación global que cuando la aireación es deficiente (escenarios 1, 4 y parcialmente el 3), el consumo del OD es muy rápido en la laguna y prácticamente no existe diferencias en las condiciones de distribución de la concentración de OD, por lo que se presumiría que la energía gastada en los escenarios 4 y 3 puede optimizarse mucho si se plantea como un objetivo mantener condiciones estables de OD en la laguna con una concentración alrededor de 0.5 mg/l.

En la Figura 4.5-9 se puede observar la distribución de OD en los cuatro escenarios experimentales:



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

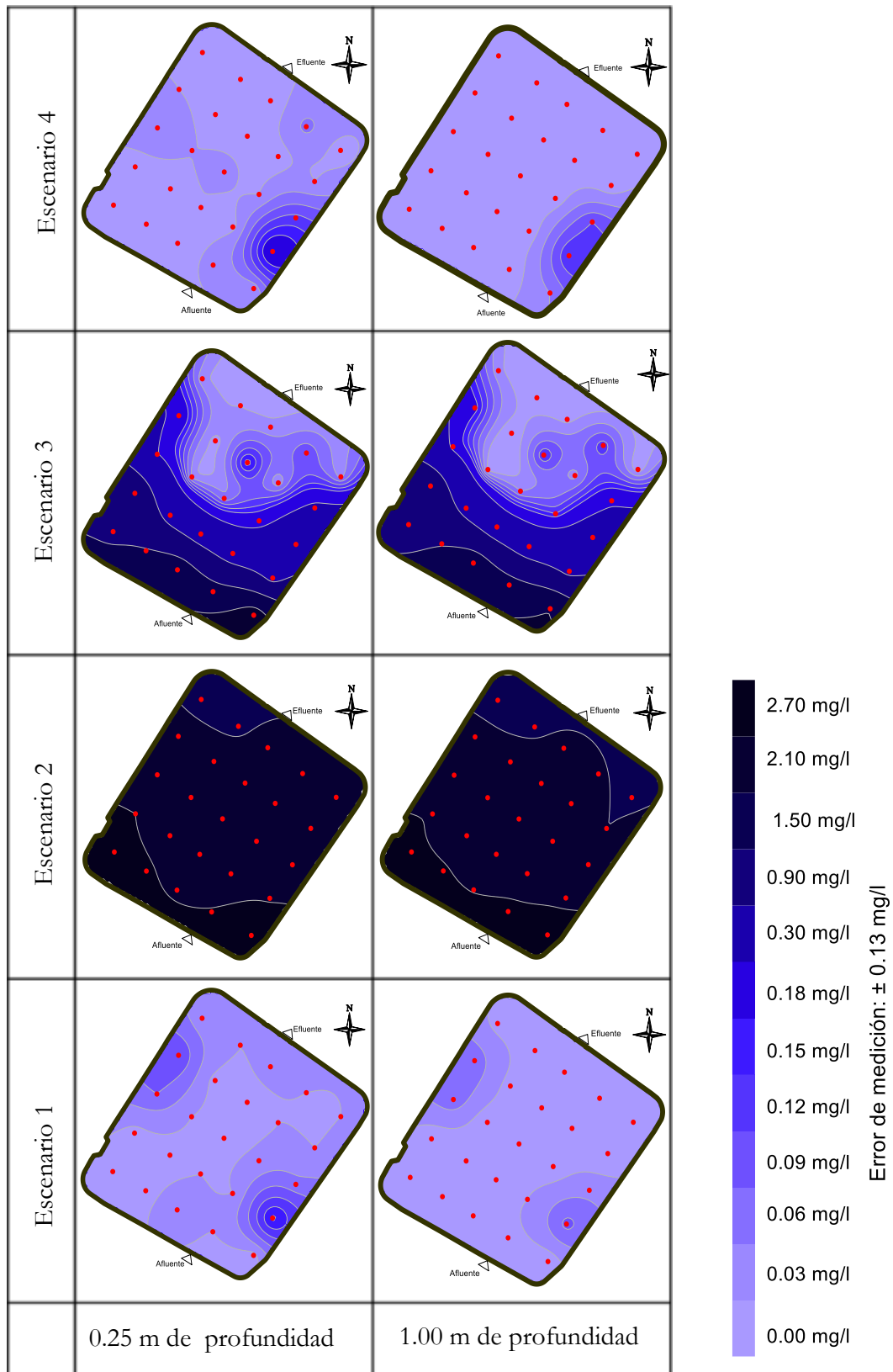


Figura 4.5-9. Distribución de OD en los 4 escenarios.



4.6 CONSUMO ENERGÉTICO Y COSTO DE CONSUMO ELÉCTRICO

En esta sección el objetivo es estimar el gasto económico que generan los aireadores considerando únicamente la laguna aireada #1. Las características de los aireadores de 25 y 75 HP están reflejados en la Tabla 4.6-1, y las tarifas del costo del consumo eléctrico se pueden observar en la Tabla 4.6-2. En la Tabla 4.6-3 se tiene la capacidad de aireación, consumo eléctrico y costo económico que conlleva la utilización de cada escenario.

Tabla 4.6-1. Características de los equipos de aireación (ETAPA & TYPSA, 2004).

Equipo de aireación-agitación	RPM	Potencia	Potencia	Transferencia de oxígeno en condiciones estándar		Transferencia de oxígeno en condiciones de campo	
		HP	kW	kgO ₂ /kW.h	lbO ₂ /HP.h	kgO ₂ /kW.h	lbO ₂ /HP.h
AIRE 02	1750	75	55.95	1.10	1.80	0.57	0.94
AIRE 02 TRITON	880	25	18.65	1.83	3.01	0.96	1.58

Tabla 4.6-2. Tarifas del costo del consumo eléctrico

Intervalo horario	Precio kW.h (\$/kW.h)
Intervalo 8h:00-18h:00	0.081
Intervalo 18h:00-22h:00	0.095
Intervalo 22h:00-8h:00	0.064

Tabla 4.6-3. Cuadro resumen de consumo energético y gasto económico de los escenarios 1, 2, 3 y 4 (considerando laguna aireada #1).

	Escenario 1			Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
	I1*	I2*	I3*			
Capacidad de aireación						
Capacidad de aireación en condiciones estándar (kgO ₂ /día)	14273.96			24600.10	15737.62	9829.30
Capacidad de aireación en condiciones de campo (kgO ₂ /día)	7448.34			12810.31	8217.94	5156.35
Potencia instalada y densidad de energía						
Número de aireadores encendidos (75 HP-55.95 kW)	4	0	10	10	4	0
Número de aireadores encendidos (25 HP-18.65 kW)	12	12	12	12	12	12
Potencia instalada (kW)	447.60	223.80	783.30	783.30	447.60	223.80
Densidad de energía (W/m ³)	3.32	1.66	5.80	5.80	3.32	1.66
Consumo eléctrico						
Consumo eléctrico diario (kW.h)	12169.13			18799.20	10742.40	5371.20
Consumo eléctrico mensual de 30 días (kW.h)	365073.75			563976.00	322272.00	161136.00
Consumo eléctrico anual (kW.h)	4441730.63			6861708.00	3920976.00	1960488.00
Costo consumo eléctrico						
Costo consumo eléctrico diario (\$)	875.53			1433.44	819.11	409.55
Costo consumo eléctrico mensual de 30 días (\$)	26265.84			43003.17	24573.24	12286.62
Costo consumo eléctrico anual (\$)	319567.71			523205.24	298974.42	149487.21

Nota: I1* = Intervalo de 6 h:45 – 16 h:30; I2* = Intervalo de 16 h:30 – 22 h:30; I3* = Intervalo de 22 h:30 – 6 h:45.

En la Tabla 4.6-4 se muestran los gastos mensuales de las dos lagunas aireadas que generarían los escenarios.



Tabla 4.6-4. Costo eléctrico mensual de las lagunas aireadas bajo diferentes escenarios.

Escenario	Costo consumo eléctrico mensual de 30 días (\$)
Escenario 1	52532
Escenario 2	86006
Escenario 3	49146
Escenario 4	24573

1. Como se analizó anteriormente, el Escenario 1 y el Escenario 4 poseen valores similares en la concentración de OD (ver Tabla 4.5-2, Tabla 4.5-5); sin embargo, el costo energético mensual (kW.h), y evidentemente el costo financiero mensual del Escenario 1 es mayor (aproximadamente el doble) al Escenario 4.
2. El Escenario 2 posee altos niveles de OD (mayores a los esperados en una laguna aireada facultativa); sin embargo, estos valores de OD vienen acompañados de un gran aumento en la demanda energética y consecuentemente un elevado costo para la operación de la PTAR que vuelve insostenible mantener por tiempo indefinido este escenario. Debido justamente al elevado costo de este escenario, no ha sido posible mantenerlo por varias semanas para observar si existe una mejora en la eficiencia de remoción de materia orgánica que pueda justificar en parte el excesivo gasto energético. Sin embargo, como se ha discutido anteriormente, la laguna aireada mantiene una biomasa que se ha adaptado a condiciones muy cercanas a un ambiente anóxico cerca de la superficie; y, mantener concentraciones de OD por encima de 1.5 hasta 2 mg/l representaría la formación de una nueva biomasa de comportamiento muy distinto al actual que no podría ser previsto con los análisis y herramientas que se han analizado en este estudio y estudios anteriores.
3. Por otra parte, el Escenario 3 posee concentraciones de OD relativamente mayores a los del Escenario 1 (ver Tabla 4.5-2, Tabla 4.5-4). Sin embargo, es necesario considerar que la aplicación del Escenario 1 (actualmente utilizado por la PTAR), es dañino para la biomasa de la laguna, debido a las condiciones extremas a las que deben adaptarse los microorganismos en un mismo día (condiciones aeróbicas, anóxicas y hasta anaeróbicas). Es así que, al utilizar el Escenario 3 se mantendría un escenario operacional continuo, la capacidad de aireación es mayor y el gasto económico es menor. Así también, Alvarado et al. (2011) y Chabir et al. (2000) recomiendan tener un escenario operacional continuo para minimizar la SOD y mejorar los niveles de oxígeno.
4. Según la literatura, una laguna aireada facultativa posee una densidad de energía que varía en el rango de 0.75 – 1.5 W/m³, de tal manera que todos los escenarios planteados cumplen con tal parámetro. Cabe destacar que a excepción del Escenario 4 y el Escenario 1 en el intervalo horario de 16h30 – 22h30, los demás poseen regímenes de mezcla completa.

4.7 REQUERIMIENTOS DE OXÍGENO Y ENERGÍA

En la Tabla 4.7-1 y Tabla 4.7-2 se tienen los resultados de los requerimientos de oxígeno y energía respectivamente:



Tabla 4.7-1. Requerimiento de oxígeno (RO) en la laguna aireada.

Parámetro	Valor
a (kgO ₂ /kgDBO ₅)	1
Q (m ³ /día)	67415.24
S ₀ (g/m ³)	115.88
S (g/m ³)	7.94
RO (kgO ₂ /día)	7277.06

Tabla 4.7-2. Requerimiento de energía (RE) de la laguna aireada.

Parámetro	Valor
EOestandar (kgO ₂ /kW.h)	1.6
Coeficiente de reducción (%)	60
EOcampo (kgO ₂ /kW.h)	0.96
RE (kW)	315.84

Tabla 4.7-3. Eficiencia de los escenarios en términos de energía y oxígeno suministrado.

		Capacidad de aireación en condiciones de campo		Potencia instalada	
		kgO ₂ /día	Condición	kW	Condición
Escenario 1	I1 de 6h:45 a 16h:30			447.60	Cumple
	I2 de 16h:30 a 22h:30	7448.34	Cumple	223.80	No cumple
	I3 de 22h:30 a 6h:45			783.30	Cumple
Escenario 2		12810.31	Cumple	783.30	Cumple
Escenario 3		8217.94	Cumple	447.60	Cumple
Escenario 4		5156.35	No cumple	223.80	No cumple

Según los resultados obtenidos en los requerimientos se puede determinar lo siguiente:

1. La laguna aireada posee un requerimiento de energía y de oxígeno de 315.84 kW y 7277.06 kgO₂/día respectivamente. Comparando la capacidad de aireación de los escenarios planteados con el requerimiento de oxígeno de la laguna aireada, se puede observar que solo el Escenario 4 no cumple tal valor. Sin embargo, en el Escenario 1, a pesar de cumplir teóricamente con el oxígeno necesario, las pruebas experimentales y el posterior análisis determinaron que existe un consumo de oxígeno mayor al requerimiento calculado, lo que indica que existe una fuente adicional de demanda de oxígeno. Esta demanda adicional podría deberse a la demanda béntica que, como se detalla en apartados anteriores, se propicia diariamente en la laguna con el encendido de los aireadores y la consecuente abrupta suspensión del lodo del fondo de la laguna.
2. Respecto al requerimiento de energía, únicamente el Escenario 4 posee una potencia instalada que no cumple con tal valor. Así también, en el escenario operacional actual (Escenario 1), en el segundo intervalo horario, no se cumple con los requerimientos de energía.

4.8 ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE FLUJO OBSERVADOS

En la Tabla 4.8-1 se observa los resultados obtenidos a partir de la metodología anteriormente explicada para el presente apartado.

Tabla 4.8-1. Cuadro resumen de trazadores flotantes en los cuatro escenarios.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Velocidad superficial				
Distancia (m)	33.44	33.44	33.44	33.44
Tiempo (min)	1.50	1.49	1.28	1.42
Velocidad (m/min)	22.29	22.44	26.13	23.55
Cortocircuito				
Tiempo (min)	16	No existe	20	14

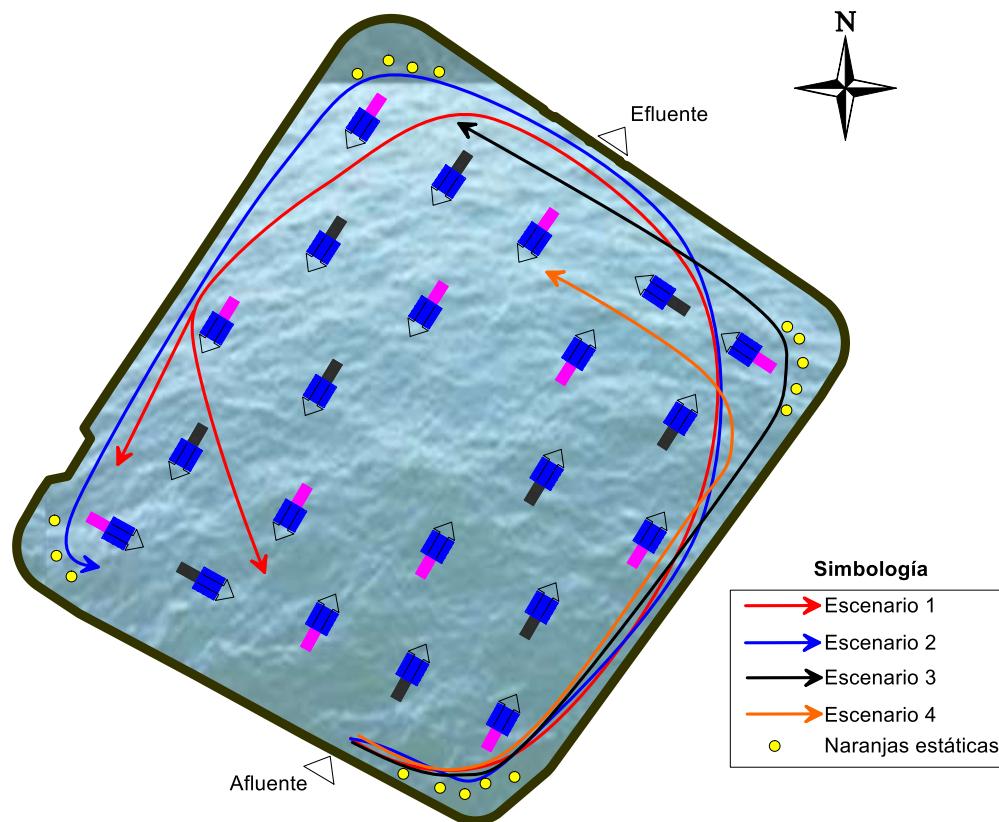


Figura 4.8-1. Resultados de los trazadores flotantes en la laguna de los cuatro escenarios.

El análisis que se determina teniendo en cuenta las cuatro pruebas realizadas es el siguiente:

1. Se determina que las cuatro esquinas de la laguna de estudio son puntos estancados, lo que se debe principalmente a gradientes de velocidad bajas o nulas en los vértices de la laguna (cuadrática) que tiene un patrón de flujo circular.
2. El flujo mantiene una dirección y sentido preferencial, basado en la disposición de los aireadores, generándose de esta manera movimientos circulares, mencionado anteriormente (Figura 4.8-1).



3. La velocidad promedio superficial es de 23.60 m/min lo cual es un valor alto debido a la influencia de los aireadores.
4. Se produce un cortocircuito en un intervalo de tiempo de 14 a 20 minutos. Este valor es similar al encontrado por Alvarado et al. (2011) donde se utilizó modelos computacionales de flujo dinámico (CFD) para describir la hidráulica de la laguna aireada #1. Este modelo fue calibrado con pruebas de trazadores fluorescentes que detectaron un cortocircuito en este mismo orden de magnitud.

4.9 DEMANDA BÉNTICA

Se estimó una SOD a partir de la Ecuación 2.4-4. Los parámetros impuestos a partir de Chapra (2008) se observan en la Tabla A9-2. Existen tres variables que dependen directamente de la laguna de estudio que son: L_{PW} , $o(0)$ y K_C . Para L_{PW} (estimación de la materia orgánica particulada en el efluente) se toma un valor de 42.53 mg/l (proporcionado por la PTAR, considerando los años 2013, 2014 y 2015). Se ha decidido realizar un análisis de sensibilidad en la Ecuación 2.4-4 en vista de la poca certidumbre para la estimación de estos parámetros. Así, para $o(0)$ y K_C se han analizado la variación de la SOD, variando estos parámetros dentro de los rangos mostrados en la Tabla A9-2.

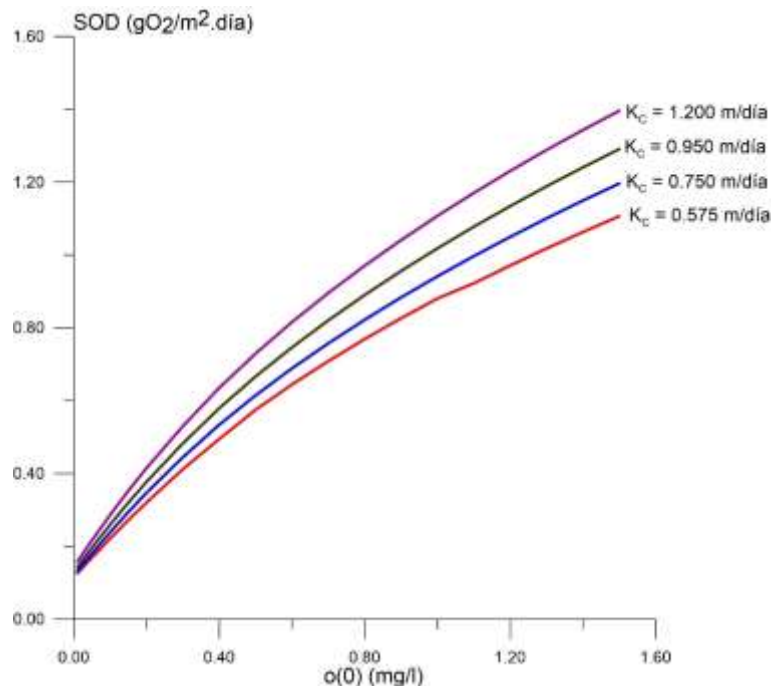


Figura 4.9-1. SOD de la laguna aireada #1.

1. Como se puede observar en la Figura 4.9-1 existe una relación directa entre la SOD con el $o(0)$ y el K_C , es decir al aumentar tanto la tasa de descomposición del metano como el oxígeno en la capa superpuesta de agua, aumenta la SOD (ver Figura 4.9-1).
2. El escenario actual de la PTAR mantiene concentraciones de OD que oscilan entre 0.01 – 0.05 mg/l a 1.00 m de profundidad (valores más bajos). Si se considera un K_C bajo, los valores SOD varían de 0.13 – 0.17 gO₂/m².día.
3. El Escenario 2 posee concentraciones de OD altas, por lo tanto considerando valores de $o(0) = 1.5$ mg/l y $K_C = 1.2$ m/día se tiene una SOD de 1.40 gO₂/m².día (caso perjudicial).



4. Evidentemente, considerando la SOD, la configuración más perjudicial que mantiene la PTAR está en el intervalo horario de 10h30 – 6h45 (todos los aireadores) debido a que la misma representa un consumo de 4.78 kgO₂ en 8.75 horas, sin embargo dicho valor no es significativo, ya que el escenario operacional actual posee una capacidad de aireación de hasta 7448.34 kgO₂/día.
5. Según Chabir et al. (2000) la heterogeneidad espacial y la resuspensión de los sedimentos son factores extremadamente importantes que influyen en la SOD no sólo cuando se utilizan aireadores mecánicos, sino también pueden ser inducidos por la producción de gas, el bombeo o la extracción de depósitos.

4.10 PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO PARA LA OPERACIÓN DE LA LAGUNA AIREADA

Propuesta 1; Implementar el Escenario 3, el mismo que consiste en el funcionamiento continuo de todos los aireadores de 25 HP y 4 de 75 HP: al mantener dicho sistema operacional de aireación, mejorarían los niveles de oxígeno dentro de la laguna de estudio (según la literatura), lo que representa condiciones predominantemente aerobias, por lo que la cinética de remoción de la materia orgánica incrementaría sustancialmente en el sistema. Asimismo como se explicó anteriormente, la literatura menciona que un escenario continuo reduciría la demanda adicional de OD, como por otra parte se tiene un régimen de mezcla completa. En términos económicos; al utilizar dicha propuesta, el costo mensual es de \$49146, por ende ETAPA ahorraría \$3386 mensualmente (considerando las 2 lagunas).

Propuesta 2; Considerar la suspensión definitiva de los aireadores de 75 HP: para ello, es necesario considerar que cada laguna aireada requiere una potencia instalada de 315.84 kW, es así que es necesario tener 17 aireadores de 25 HP distribuidos de forma homogénea en cada laguna. De esta forma, considerando tal cambio, las lagunas aireadas generarían un gasto mensual de \$ 34804, por ende ETAPA ahorraría \$ 17720 mensualmente (considerando las 2 lagunas).

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se realizó un estudio detallado para conocer la distribución y el comportamiento de OD en la laguna aireada #1 mediante diferentes escenarios operacionales. Las conclusiones presentadas a continuación se basan en observaciones y análisis realizados durante los trabajos de campo y reforzados con revisión de literatura.

1. Los mapas de distribución de OD demuestran que existe una buena mezcla vertical (en el rango medido 0.25 y 1.00 m) debido a que las concentraciones a 0.25 m y a 1.00 m de OD no varían de manera significativa.
2. A excepción del Escenario 2, todos poseen concentraciones de OD relativamente bajas, como consecuencia de múltiples factores, entre los que se destaca: el escaso volumen de oxígeno suministrado por los aireadores, la acumulación de lodos e incremento de la carga orgánica que aumentan la demanda de oxígeno en el tiempo.
3. Existe un patrón de flujo circular en la laguna que mantiene una dirección y sentido preferencial como consecuencia de la disposición de los aireadores mecánicos.
4. Todas las zonas excepto las cercanas a las esquinas de la laguna de estudio, son influenciadas directamente por la mezcla que se da en la misma. Es decir, en las esquinas se forman zonas de estancamiento como consecuencia de gradientes de



- velocidad bajas o nulas en tales lugares. Por otra parte, se han evidenciado cortocircuitos que reducen la eficiencia global de la unidad de tratamiento.
5. El escenario más aceptable en términos económicos y energéticos es el 3, debido a que mantiene un sistema operacional continuo, y como se analizó con anterioridad, puede mejorar sustancialmente los niveles de OD, favoreciendo el proceso bioquímico que ocurre dentro de la laguna. Así también, éste posee una mayor capacidad de aireación, lo que representa una mejora sustancial en el rendimiento de la laguna. Finalmente, dicho escenario posee una densidad energética aceptable.
 6. El consumo adicional de OD debido a la SOD no es un factor determinante en los niveles de OD que mantiene la laguna. Sin embargo, los valores calculados a partir de la Ecuación 2.4-4 pueden aumentar considerablemente al momento del encendido de los aireadores cuando un gran volumen de sedimentos entra en suspensión abruptamente.
 7. El comportamiento diario de OD en el escenario actual de operación demuestra que existe un desfase temporal en la respuesta de OD medido en la laguna respecto de la de la potencia suministrada en la aireación; que se explica por la mayor velocidad de consumo de oxígeno en comparación con la velocidad con la que el OD se incorpora en la masa de agua a partir de la aireación mecánica.
 8. Las cargas de DBO, DQO, SS, SSV y ST muestran un esperado comportamiento incremental producto del crecimiento de la población en la ciudad y su red de cobertura; que, a su vez han causado un aumento en los volúmenes de acumulación de lodos dentro de la laguna.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda enfáticamente estudiar por un tiempo prolongado un escenario operacional continuo en la laguna aireada, proporcionando un ambiente mucho más adecuado para que la biomasa bacteriana se multiplique y cumpla de mejor manera su función de digestión de la materia orgánica. Además, evitando incrementar la demanda béntica que ocasiona el recurrente encendido de los aireadores.
2. Se recomienda observar si existe una mejora en la eficiencia de remoción de materia orgánica, cabe resaltar que para ello, se necesita mantener el escenario en operación por varias semanas o inclusive meses.
3. Se sugiere efectuar mediciones a mayor profundidad, para de esta forma determinar condiciones de mezcla vertical a lo largo de toda la capa de agua.
4. El presente proyecto impulsa a futuras investigaciones en otros sistemas de tratamiento que necesiten optimizar el gasto energético y económico sin afectar el rendimiento de las unidades de tratamiento.



REFERENCIAS

- A. Pérez-Foguet, M. Carrillo, & F. Magrinyà. (2003). *TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO HUMANO. AGUA E INFRAESTRUCTURA* (Primera).
- Abis, K. L., & Mara, D. (2005). Research on waste stabilization ponds in the United Kingdom: sludge accumulation in pilot-scale primary facultative ponds. *Environmental Technology*, 26(4), 449–457. <https://doi.org/10.1080/09593332608618555>
- akralab. (2012, Abril). CATÁLOGO WTW EQUIPOS 2013, AKRALAB.
- Alvarado, A. (2005, Abril). *DRYING OF STABILISATION POND SLUDGE AND ITS QUALITY FOR REUSE IN LAND APPLICATION*. Cuenca, Ecuador.
- Alvarado, A., Vedantam, S., Durazno, G., & Nopens, I. (2011). Hydraulic assessment of waste stabilization ponds: Comparison of computational fluid dynamics simulations against tracer data. *Maskana*, 2(1), 81–89.
- Alvarado, A., Vesvikar, M., Cisneros, J. F., Maere, T., Goethals, P., & Nopens, I. (2013). CFD study to determine the optimal configuration of aerators in a full-scale waste stabilization pond. *Water Research*, 47(13), 4528–4537. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.016>
- Baena, L., Silva, J. P., & Ramírez, C. (2004). ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES BÉNTICAS EN EL RÍO CAUCA, 7.
- Belila, A., Abbas, B., Faza, I., Saidi, N., Snoussi, M., Hassen, A., & Muyzer, G. (2013). Sulfur bacteria in wastewater stabilization ponds periodically affected by the “red-water” phenomenon. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(1), 379–394. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3931-5>
- Bracho, N., & Aldana, G. (2009). Determinación de la velocidad del fluido en las lagunas de maduración de Lidsey. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica*, 1(2). Recuperado a partir de <http://www.journals.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14411>
- Buitrago, G., Otálvaro, A., & Duarte, P. (2013). Evaluación de la transferencia de oxígeno en un biorreactor convencional con aireador externo. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 15(2), 106–114. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v15n2.41272>
- Cárdenas, J. G. (2012, junio). *MODELACION DINAMICA DE LAS LAGUNAS DE OXIDACION DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO*. UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL, Guayaquil.
- Cedillo, J. S., & Matailo, M. M. (2011, septiembre). *VALIDACIÓN DE MODELOS COMPUTACIONALES DE FLUJO DINÁMICO CON PRUEBA DE TRAZADORES EN LAGUNAS DE GRAN ESCALA*. UNIVERSIDAD DE CUENCA, Cuenca, Ecuador.
- Cerezo, J. A. (2011, junio 15). *ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES*. UNUNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Barcelona, España.
- Chabir, D., El Ouarghi, H., Brostaux, Y., & Vassel, J.-L. (2000). Some influences of sediments in aerated lagoons and waste stabilization ponds. *Water Science & Technology*, 42(10). Recuperado a partir de <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/18958>
- Chapra, S. C. (2008). *Surface Water-Quality Modeling*. Waveland Press.
- Chernicharo, C. A. de L. (2007). *Anaerobic Reactors*. IWA Publishing.
- CONAGUA. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas Aireadas. Recuperado a partir de <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro48.pdf>
- Corrales, L. C., Romero, D. M. A., Macías, J. A. B., & Vargas, A. M. C. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *NOVA*, 13(24), 55–82.
- Correa, G. (2008). *EVALUACIÓN Y MONITOREO DEL SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE SANTA FÉ DE ANTIOQUIA, COLOMBIA*. UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, Colombia, Medellín.
- Cruz, L. E., Alayón, W., & Monsegny, C. E. (2000). Metodología Para la Selección del Regimen de Flujo en Lagunas de Estabilización., (46).
- Davis-Colley, R. J., Donnison, A. M., & Speed, D. J. (2000). Towards a mechanistic understanding of pond disinfection. *Water Science and Technology*, 42(10–11), 149–158.
- Dunner, I. (2004, Enero). *EVALUACIÓN INTEGRAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS Y ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO EN LOCALIDADES RURALES CONCENTRADAS. APLICACIONES EN LAS REGIONES R.M Y VII (MASTER)*. UNIVERSIDAD DE CHILE, Chile.
- Durazno, G. (2009). Generación, acumulación, distribución y características de lodos de Lagunas de Estabilización, 16.
- ETAPA. (2007). *Informe de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales-Situación a Diciembre del 2006*. (p. 242). Cuenca, Ecuador: ETAPA.
- ETAPA. (2015). *RESULTADOS PTAR UCUBAMBA*. Cuenca, Ecuador: ETAPA.
- ETAPA, & TYPISA. (2004). *Diseños Finales Ila Fase Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento de la ciudad de Cuenca*. (Estudio comparativo de alternativas de ampliación de capacidad de aireación.). Cuenca, Ecuador: ETAPA.
- Hernández, A. (2015). *Depuración y Desinfección de aguas residuales* (Sexta edición). España: Garceta.
- Huang, W., Li, K., Wang, G., & Wang, Y. (2013). Computational Fluid Dynamics Simulation of Flows in an Oxidation Ditch Driven by a New Surface Aerator. *Environmental Engineering Science*, 30(11), 663–671. <https://doi.org/10.1089/ees.2012.0313>



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

- INEN. (2014). *CALIDAD DEL AGUA. DETERMINACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO. MÉTODO ELECTROQUÍMICO CON Sonda (ISO 5814:2012, IDT)* (Norma) (p. 20). Quito, Ecuador: Instituto ecuatoriano de normalización, INEN.
- Jácome, A., Suárez, J., & Ures, P. (2015). *LAGUNAS AIREADAS (FT-BIO-011)* (p. 20). España: Universidad de La Coruña.
- Mahmood, Q., Pervez, A., Zeb, B. S., Zaffar, H., Yaqoob, H., Waseem, M., ... Afsheen. (2013). Natural Treatment Systems as Sustainable Ecotechnologies for the Developing Countries. *BioMed Research International*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/796373>
- Mara, D. (2013). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries*. Routledge.
- Matsumoto, T., Ortiz, S., & Andrés, I. (2011). PERFORMANCE OF AN ANAEROBIC POND WITH DIVISOR BAFFLE FOLLOWED BY A FACULTATIVE POND, POSSIBLE INVOLVEMENT IN PUBLIC HEALTH. *Universidad y Salud*, 13(1), 46–60.
- Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery* (FIFTH EDITION). New York: McGraw-Hill.
- Morras, M. (2015, julio). UNIVERSITY OF NAVARRA.
- Moura, A., Tácio, M., Henriques, I., Dias, J., Ferreira, P., & Correia, A. (2009). Characterization of bacterial diversity in two aerated lagoons of a wastewater treatment plant using PCR-DGGE analysis. *Microbiological Research*, 164(5), 560–569. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2007.06.005>
- Nelson, K. L., Cisneros, B. J., Tchobanoglous, G., & Darby, J. L. (2004). Sludge accumulation, characteristics, and pathogen inactivation in four primary waste stabilization ponds in central Mexico. *Water Research*, 38(1), 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.013>
- Nodal, E. (2001). PROCESOS BIOLÓGICOS APLICADOS AL AGUA RESIDUAL, 22, 5.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Guereca, L. (2013). *SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES* (Primera). México.
- Oakley, S. M. (2005, junio). LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN HONDURAS. Manual de Diseño, Construcción y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad.
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica* (Primera). España.
- OMS, & Unicef. (2015). *Progresos en materia de saneamiento y agua potable* (p. 90). OMS.
- ONU. (2012). *Objetivos de Desarrollo del Milenio: Tabla de progreso, 2012* (p. 1). ONU.
- Rengel, A. (2000). *Agua para consumo humano*. Quito: CAMAREN: Capacitación para el Manejo de los Recursos Naturales Renovables. Recuperado a partir de http://biblioteca.uazuay.edu.ec/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=51959
- Rodríguez, J. A., Lozada, P. T., & Uribe, I. E. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et Technica*, 3(23), 75–80.
- Rojas, R. (2002, septiembre). GETIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.
- Rolim, S. (2006, febrero). LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN. Recuperado a partir de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Febrero2006/CD-2/pdf/spa/doc13030/doc13030-1.pdf>
- Sainz, J. A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. EOI Esc.Organiz.Industrial.
- Saracho, M., Rodríguez, N., Iriarte, A., & Flores, M. (2006). EFICIENCIA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA CIUDAD DE CATAMARCA Y SU RELACIÓN CON LA ESTIMADA POR LOS MODELOS DE DISEÑO, 10, 8.
- SENPLADES. (2014). *Agua potable y alcantarillado para erradicar la pobreza en el Ecuador* (p. 120). Quito, Ecuador.
- Sperling, M. V. (2007). *Basic Principles of Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- Sperling, M. V. (2007). *Waste Stabilisation Ponds*. IWA Publishing.
- Sperling, M. V. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing.
- Suárez, J., & Fernández, N. (2009, marzo). CALIDAD DE AGUAS EN RÍOS AUTODEPURACIÓN. Recuperado a partir de ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Segundo_Curso/Modelos_de_Calidad_de_Aguas/material%202010-2011/MCA_TEMA_5_complemento_3_demanda_bentica_de_oxigeno.pdf
- Torres, P., & Pérez, A. (2010, septiembre). Actividad Metanogénica Específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Recuperado a partir de <http://uniciencia.ambientalex.info/revistas/Eidenar.uvalle.12010.pdf>
- United Nations. (2015). *The Millennium Development Goals Report 2015* (p. 15). New York: United Nation. Recuperado a partir de http://www.un.org/millenniumgoals/2015_MDG_Report/pdf/MDG%202015%20Summary%20web_english.pdf
- Universidad Autónoma de Chihuahua. (2008). Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales. MICROBIOLOGÍA EN LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Recuperado a partir de <http://www.geocities.ws/edrochac/residuales/microbiologia1.pdf>
- WTW. (2015). *Multi 3420. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DIGITAL PARA SENSORES IDS. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN*. Alemania: WTW.
- Yu, Z., & Mohn, W. W. (2001a). Bacterial Diversity and Community Structure in an Aerated Lagoon Revealed by Ribosomal Intergenic Spacer Analyses and 16S Ribosomal DNA Sequencing. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(4), 1565. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.4.1565-1574.2001>

**ANEXOS****ANEXO #1: VALORES PARA EL CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE
OXÍGENO**

Tabla A1-1. Presión barométrica según la altitud. Fuente: adaptado de ETAPA & TYPISA (2004).

Altitud (m)	Barómetro (mmHg)
0	760
305	733
610	706
914	681
1219	656
1524	632
1829	610
2438	566
3048	526
3658	487
4267	454

Tabla A1-2. Saturación de OD en el agua expuesta al aire saturado de unidad, con 20.9 % de oxígeno y presión de 760 mm Fuente: adaptado de ETAPA & TYPISA (2004).

Temperatura (°C)	Concentración de cloruro en agua (mg/l)			Diferencia por 100 mg de cloruros	Presión del vapor (mm)
	0	5000	10000		
0	14.6	13.8	13.0	0.017	5.0
1	14.2	13.4	12.6	0.016	5.0
2	13.8	13.1	12.3	0.015	5.0
3	13.5	12.7	12.0	0.015	6.0
4	13.1	12.4	11.7	0.014	6.0
5	12.8	12.1	11.4	0.014	7.0
6	12.8	11.8	11.1	0.014	7.0
7	12.2	11.5	10.9	0.013	8.0
8	11.9	11.2	10.6	0.013	8.0
9	11.6	11.0	10.4	0.012	9.0
10	11.3	10.7	10.1	0.012	9.0
11	11.1	10.5	9.9	0.011	10.0
12	10.8	10.3	9.7	0.011	11.0
13	10.6	10.1	9.5	0.011	11.0
14	10.4	9.9	9.3	0.010	12.0
15	10.2	9.7	9.1	0.010	13.0
16	10.0	9.5	9.0	0.010	14.0
17	9.7	9.3	8.8	0.010	15.0
18	9.5	9.1	8.6	0.009	16.0
19	9.4	8.9	8.5	0.009	17.0
20	9.2	8.7	8.3	0.009	18.0
21	9.0	8.6	8.1	0.009	19.0
22	8.8	8.4	8.0	0.008	20.0
23	8.7	8.3	7.9	0.008	21.0
24	8.5	8.1	7.7	0.008	22.0
25	8.4	8.0	7.6	0.008	24.0
26	8.2	7.8	7.4	0.008	25.0
27	8.1	7.7	7.3	0.008	27.0
28	7.9	7.5	7.1	0.008	28.0
29	7.8	7.4	7.0	0.008	30.0
30	7.6	7.3	6.9	0.008	32.0

**ANEXO #2: TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LA PTAR DE
UCUBAMBA**

a)



b)



c)

Figura A2-1. a) Cajón de llegada; b) By-pass; c) Pantalla disipadora. Fuente: autores.



a)



b)

Figura A2-2. a) Cribas autolimpiantes; b) Rejilla. Fuente: autores.

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA



a)



b)

Figura A2-3. a) Disipadores de energía en desarenador; b) Desarenador con brazo raspador circular. Fuente: autores.



a)



b)



c)

Figura A2-4. a) Tornillo sin fin; b) Canal de derivación; c) Arena cubierta con cal. Fuente: autores.

**ANEXO #3: CARGAS ORGÁNICAS Y DE SÓLIDOS**

Tabla A3-1. Cargas en kg/día que ingresan a la PTAR.

Año	DBO	DQO	SS	SSV	ST
2000	8117	26218	18778	-	-
2001	7539	24065	14262	-	-
2002	8530	24176	14752	-	-
2003	10224	23819	16482	-	-
2004	10824	24929	14224	-	-
2005	9394	22327	15811	-	-
2006	9505	23502	13513	-	-
2007	10144	24976	15587	9901	-
2008	9026	21746	15752	8821	-
2009	10462	25014	19588	9807	-
2010	11765	29204	24381	12558	52075
2011	-	-	-	-	-
2012	11244	26869	24802	11744	56816
2013	13534	30707	25833	13009	60759
2014	13895	31536	26626	13743	61189
2015	17402	38298	28229	18180	62712

ANEXO #4: CONCENTRACIONES EN LA LAGUNA AIREADA

Tabla A4-1. Concentraciones en mg/l de la laguna aireada en el año 2013.

Mes	Afluente				Efluente				Caudal (m ³ /s)
	DBO ₅	DQO	SS	SSV	DBO ₅	DQO	SS	SSV	
Enero	96.00	186.00	140.00	82.00	40.00	91.00	122.00	59.00	0.748
Febrero	113.00	230.00	176.00	107.33	36.67	131.00	109.33	55.67	0.713
Marzo	100.00	239.00	169.00	91.00	37.33	127.00	125.67	55.33	0.765
Abril	89.33	201.33	214.67	99.67	31.67	154.00	131.33	58.00	0.745
Mayo	123.50	286.25	256.25	134.00	48.75	196.50	201.25	78.50	0.797
Junio	85.00	192.33	188.00	69.00	31.33	163.33	148.67	60.00	0.761
Julio	92.00	213.75	160.75	89.25	50.50	219.50	300.50	112.50	0.769
Agosto	83.00	259.00	169.00	94.50	65.00	262.50	380.00	141.00	0.790
Septiembre	94.50	235.00	184.00	92.00	58.50	209.00	230.00	102.00	0.766
Octubre	94.33	252.00	144.00	91.00	46.67	229.00	249.67	101.33	0.811
Noviembre	100.00	211.00	111.50	85.50	67.00	251.50	339.00	136.00	0.759
Diciembre	98.00	238.00	90.00	68.00	56.00	256.00	298.00	134.00	0.796



Tabla A4-2. Concentraciones en mg/l de la laguna aireada en el año 2014.

Mes	Afluente				Efluente				Caudal (m ³ /s)
	DBO ₅	DQO	SS	SSV	DBO ₅	DQO	SS	SSV	
Enero	107.40	237.80	138.40	83.60	51.75	259.20	308.00	132.80	0.791
Febrero	72.33	169.00	129.67	71.00	51.67	255.67	300.33	123.00	0.764
Marzo	107.50	177.75	118.50	57.00	32.75	172.00	173.50	74.25	0.852
Abril	104.67	250.00	245.33	125.00	70.00	356.33	563.00	210.67	0.805
Mayo	67.50	165.00	189.67	80.00	31.67	300.50	257.33	85.00	0.870
Junio	67.20	172.60	116.40	68.40	48.40	269.40	355.60	126.60	0.844
Julio	116.00	275.67	232.00	135.00	50.33	259.33	259.00	150.33	0.810
Agosto	103.00	245.75	158.50	99.50	47.00	210.50	227.00	101.25	0.779
Septiembre	133.20	329.80	169.00	109.00	61.20	267.00	361.00	171.50	0.738
Octubre	143.00	266.25	186.25	97.00	48.00	241.50	243.75	117.00	0.674
Noviembre	121.67	225.33	103.00	76.00	48.67	238.67	127.04	67.08	0.722
Diciembre	147.67	300.33	163.67	106.33	61.00	306.33	248.67	122.67	0.774

Tabla A4-3. Concentraciones en mg/l de la laguna aireada en el año 2015.

Mes	Afluente				Efluente				Caudal (m ³ /s)
	DBO ₅	DQO	SS	SSV	DBO ₅	DQO	SS	SSV	
Enero	88.33	194.00	147.67	85.33	54.33	157.67	281.33	126.67	0.795
Febrero	120.25	221.00	139.75	83.25	41.00	183.25	152.25	72.75	0.807
Marzo	134.40	256.80	166.80	100.20	40.40	211.40	215.00	108.40	0.824
Abril	109.00	206.33	133.00	85.67	39.00	187.33	189.00	89.67	0.780
Mayo	140.33	201.00	151.33	72.67	38.33	287.67	180.33	82.33	0.721
Junio	133.60	259.40	199.60	96.80	53.80	260.20	236.60	115.60	0.761
Julio	160.50	220.50	176.50	122.00	67.00	254.00	267.00	202.00	0.794
Agosto	199.33	325.67	180.00	129.00	47.67	207.33	149.67	113.00	0.771
Septiembre	160.67	378.00	263.33	179.33	117.00	540.67	661.33	319.33	0.800
Octubre	160.00	254.67	224.00	98.50	76.33	300.67	434.00	202.50	0.816
Noviembre	162.00	373.00	320.00	202.00	75.67	394.67	482.00	246.00	0.798
Diciembre	143.50	366.67	282.25	205.00	71.50	413.67	330.50	193.33	0.780

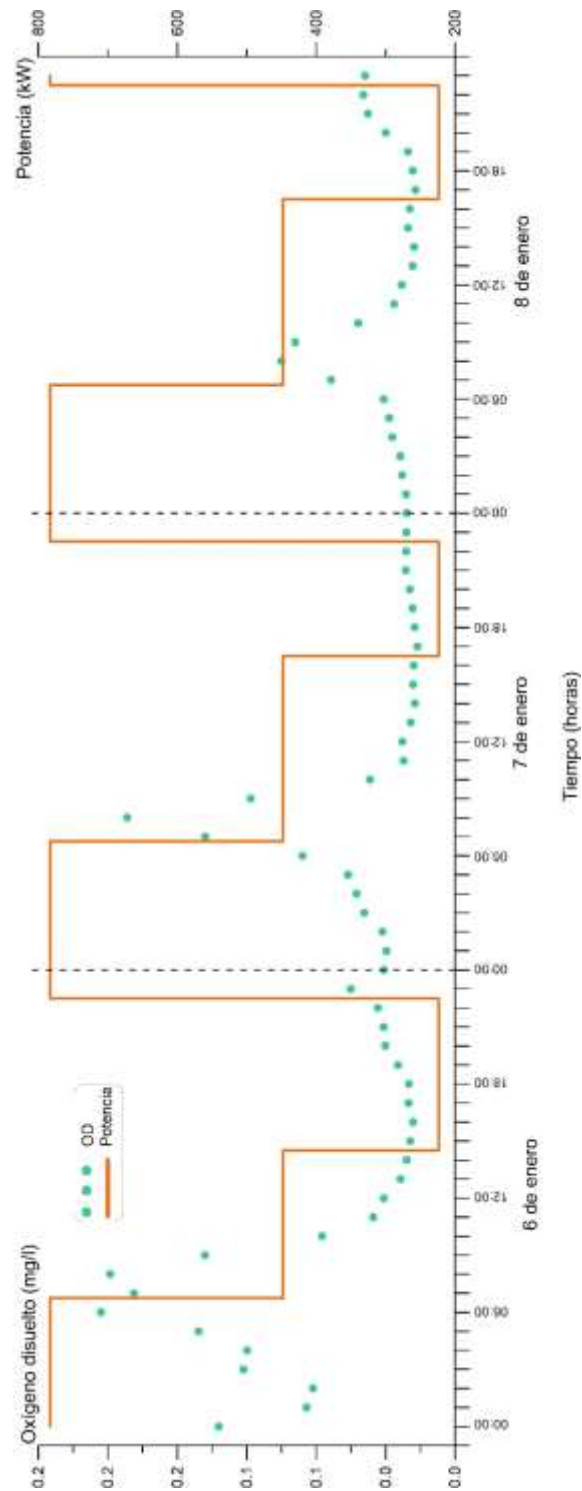
**ANEXO #5: COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO**

Figura A5-1. Oxígeno disuelto versus potencia total de aireación (6, 7 y 8 de enero de 2016).



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA

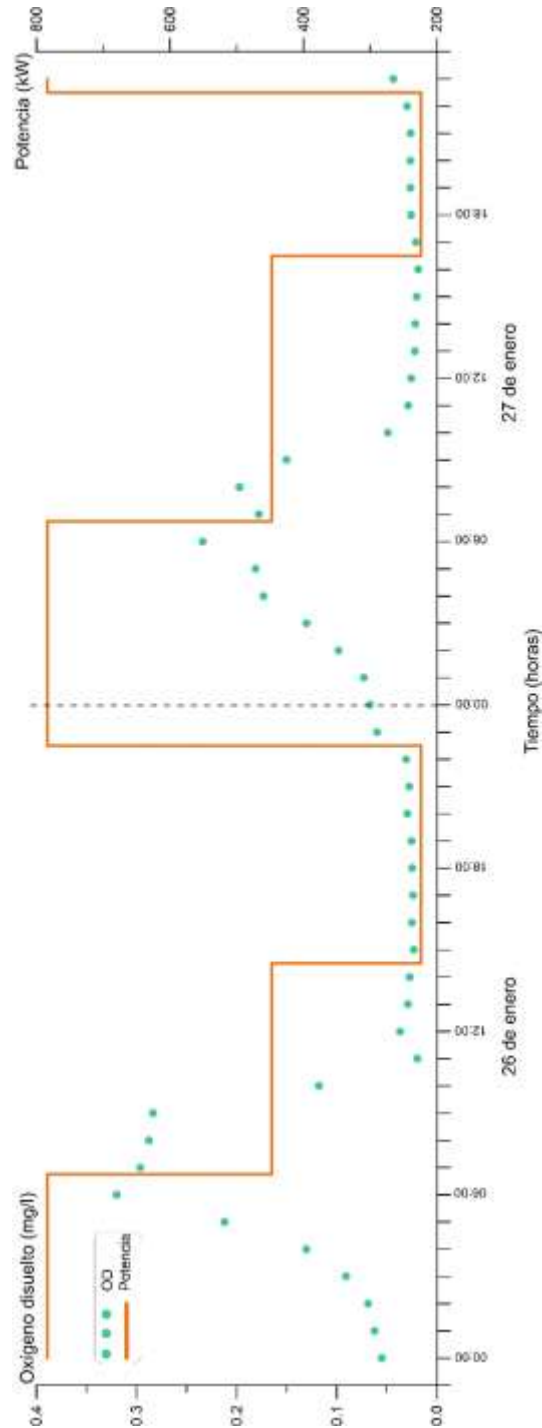


Figura A5-2. Oxígeno disuelto versus potencia total de aireación (26 y 27 de enero de 2016).



Tabla A5-1. Comportamiento del OD en la laguna.

Hora	Oxígeno disuelto (mg/l)							
	1 de enero	2 de enero	3 de enero	6 de enero	7 de enero	8 de enero	26 de enero	27 de enero
0:00	0.077	0.117	0.262	0.136	0.041	0.028	0.055	0.067
01:00	0.065	0.102	0.315	0.086	0.040	0.028	0.062	0.073
02:00	0.082	0.145	0.413	0.082	0.042	0.031	0.069	0.098
03:00	0.136	0.207	0.599	0.122	0.052	0.032	0.091	0.130
04:00	0.212	0.301	0.818	0.120	0.057	0.036	0.130	0.173
05:00	0.344	0.435	1.061	0.148	0.062	0.038	0.212	0.181
06:00	0.450	0.613	1.379	0.204	0.088	0.041	0.320	0.234
07:00	0.546	0.809	1.610	0.185	0.144	0.071	0.296	0.178
08:00	0.958	1.162	1.882	0.199	0.189	0.100	0.288	0.197
09:00	1.388	1.244	2.107	0.144	0.118	0.092	0.284	0.150
10:00	1.642	1.034	2.192	0.077	0.049	0.056	0.118	0.049
11:00	1.672	0.705	2.102	0.047	0.030	0.035	0.020	0.029
12:00	1.495	0.335	1.676	0.041	0.030	0.031	0.037	0.026
13:00	1.185	0.116	1.265	0.031	0.026	0.025	0.029	0.022
14:00	0.884	0.085	0.886	0.028	0.023	0.024	0.027	0.021
15:00	0.648	0.064	0.607	0.026	0.024	0.027	0.023	0.020
16:00	0.477	0.049	0.357	0.024	0.024	0.026	0.025	0.019
17:00	0.112	0.036	0.074	0.027	0.022	0.023	0.024	0.021
18:00	0.066	0.039	0.073	0.027	0.023	0.024	0.025	0.026
19:00	0.070	0.046	0.075	0.033	0.025	0.027	0.025	0.027
20:00	0.076	0.056	0.084	0.040	0.026	0.040	0.029	0.026
21:00	0.077	0.060	0.083	0.041	0.028	0.050	0.028	0.026
22:00	0.105	0.087	0.126	0.044	0.028	0.053	0.031	0.030
23:00	0.256	0.259	0.565	0.060	0.028	0.052	0.060	0.044

ANEXO #6: MEDICIÓN IN SITU DE OXÍGENO DISUELTO



Figura A6-1. Mediciones in situ de OD.



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA



Figura A6-2. Equipo de trabajo.



a)



b)

Figura A6-3. a) Concentración de OD; b) Bote de trabajo



Figura A6-4. Medición de OD en el desarenador.



Figura A6-5. Medición de OD en la laguna aireada #1.

ANEXO #7: TRAZADORES FLOTANTES

Figura A7-1. Lanzamiento de naranjas en el canal de derivación.



Figura A7-2. a) Recorrido preferencial de las naranjas; b y c) Zonas muertas de la laguna aireada #1.



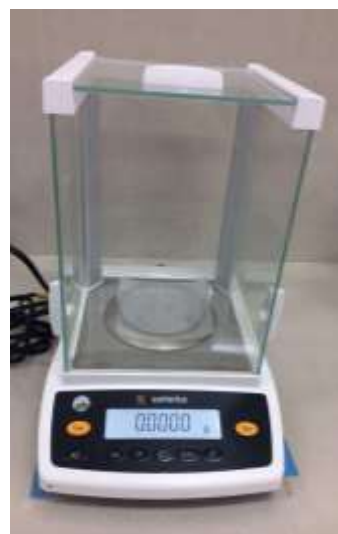
Figura A7-3. Visualización de los trazadores flotantes

ANEXO #8: ERROR DE MEDICIÓN

a)



b)



c)

Figura A8-1. a) Balón volumétrico, matraz de Erlenmeyer, varilla de vidrio; b) Sulfito de sodio; c) Balanza analítica.

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UCUBAMBA



a)



b)

Figura A8-2. a) Humedecimiento de esponja para calibración; b) Sonda IDS en el recipiente de control.



a)



b)

Figura A8-3. Llenado del agua destilada en el balón volumétrico; b) Traslado del agua al matraz de Erlenmeyer.

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA



a) b) c) d)
Figura A8-4. a) Ingreso del sulfito de sodio; b) Preparación de la disolución; c) Reposo de la disolución; d) Medición de OD.

Tabla A8-1. Tiempo de reacción del sulfito de sodio y el agua destilada.

Minuto	Segundo	OD(mg/l)	Minuto	Segundo	OD(mg/l)	Minuto	Segundo	OD(mg/l)	Minuto	Segundo	OD(mg/l)
0	0	6.42									
0	5	6.21	5	5	2.82	10	5	1.21	15	5	0.05
0	10	5.88	5	10	2.8	10	10	1.2	15	10	0.04
0	15	5.58	5	15	2.77	10	15	1.18	15	15	0.04
0	20	5.31	5	20	2.74	10	20	1.16	15	20	0.04
0	25	5.11	5	25	2.73	10	25	1.14	15	25	0.04
0	30	4.97	5	30	2.7	10	30	1.12	15	30	0.03
0	35	4.84	5	35	2.69	10	35	1.11	15	35	0.03
0	40	4.73	5	40	2.66	10	40	1.09	15	40	0.03
0	45	4.62	5	45	2.64	10	45	1.07	15	45	0.03
0	50	4.54	5	50	2.62	10	50	1.06	15	50	0.03
0	55	4.46	5	55	2.6	10	55	1.04	15	55	0.03
1	60	4.39	6	60	2.57	11	60	1.02	16	60	0.02
1	5	4.33	6	5	2.55	11	5	1	16	5	0.02
1	10	4.29	6	10	2.53	11	10	0.98	16	10	0.02
1	15	4.25	6	15	2.51	11	15	0.96	16	15	0.02
1	20	4.21	6	20	2.49	11	20	0.94	16	20	0.02
1	25	4.18	6	25	2.47	11	25	0.92	16	25	0.01
1	30	4.15	6	30	2.45	11	30	0.9	16	30	0.01
1	35	4.12	6	35	2.42	11	35	0.88	16	35	0.02
1	40	4.09	6	40	2.37	11	40	0.86	16	40	0.02
1	45	4.06	6	45	2.34	11	45	0.83	16	45	0.02
1	50	4.03	6	50	2.3	11	50	0.81	16	50	0.02
1	55	3.95	6	55	2.28	11	55	0.78	16	55	0.01
2	60	3.91	7	60	2.24	12	60	0.76	17	60	0.01
2	5	3.87	7	5	2.21	12	5	0.73	17	5	0.01
2	10	3.83	7	10	2.18	12	10	0.7			
2	15	3.8	7	15	2.14	12	15	0.67			



OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LAS LAGUNAS AIREADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DE UCUBAMBA

2	20	3.75	7	20	2.11	12	20	0.65
2	25	3.72	7	25	2.08	12	25	0.62
2	30	3.69	7	30	2.05	12	30	0.6
2	35	3.66	7	35	2.02	12	35	0.57
2	40	3.63	7	40	1.99	12	40	0.54
2	45	3.59	7	45	1.95	12	45	0.5
2	50	3.57	7	50	1.92	12	50	0.46
2	55	3.54	7	55	1.9	12	55	0.44
3	60	3.51	8	60	1.87	13	60	0.41
3	5	3.49	8	5	1.83	13	5	0.39
3	10	3.46	8	10	1.81	13	10	0.37
3	15	3.43	8	15	1.78	13	15	0.35
3	20	3.41	8	20	1.76	13	20	0.33
3	25	3.38	8	25	1.73	13	25	0.31
3	30	3.35	8	30	1.7	13	30	0.28
3	35	3.33	8	35	1.67	13	35	0.26
3	40	3.31	8	40	1.65	13	40	0.24
3	45	3.28	8	45	1.62	13	45	0.22
3	50	3.26	8	50	1.59	13	50	0.2
3	55	3.23	8	55	1.56	13	55	0.19
4	60	3.19	9	60	1.53	14	60	0.17
4	5	3.15	9	5	1.51	14	5	0.15
4	10	3.11	9	10	1.49	14	10	0.14
4	15	3.06	9	15	1.46	14	15	0.13
4	20	3.03	9	20	1.44	14	20	0.11
4	25	3.01	9	25	1.41	14	25	0.11
4	30	2.99	9	30	1.38	14	30	0.1
4	35	2.96	9	35	1.35	14	35	0.09
4	40	2.94	9	40	1.33	14	40	0.09
4	45	2.93	9	45	1.3	14	45	0.08
4	50	2.89	9	50	1.28	14	50	0.08
4	55	2.87	9	55	1.26	14	55	0.07
5	60	2.85	10	60	1.24	15	60	0.06

**ANEXO #9: DEMANDA BÉNTICA EN LA LAGUNA AIREADA**

Tabla A9-1. Valores de SOD en laguna aireada #1.

o(0) (mg/l)	K _C (m/día)			
	0.575	0.750	0.950	1.200
0.01	0.126	0.131	0.142	0.158
0.05	0.169	0.180	0.196	0.217
0.10	0.222	0.239	0.260	0.287
0.15	0.272	0.294	0.320	0.353
0.20	0.321	0.347	0.377	0.415
0.30	0.412	0.445	0.483	0.530
0.40	0.495	0.534	0.579	0.635
0.50	0.575	0.615	0.667	0.730
0.60	0.644	0.689	0.747	0.816
0.70	0.709	0.758	0.821	0.896
0.80	0.769	0.822	0.890	0.971
0.90	0.826	0.884	0.956	1.041
1.00	0.881	0.942	1.018	1.108
1.10	0.922	0.997	1.078	1.171
1.20	0.971	1.050	1.134	1.231
1.30	1.018	1.101	1.189	1.288
1.40	1.063	1.150	1.241	1.344
1.50	1.107	1.197	1.291	1.396

Tabla A9-2. Parámetros de la SOD.

Parámetro	Valor
V _s (m/día)	0.3
J _C (gO ₂ /m ² .día)	12.76
K _D (m/día)	0.00139
C _S (mgO ₂ /l)	100
K _N (m/día)	0.897
r' _{on} (gO ₂ /gN)	1.714
a _{no} (gN/gO ₂)	0.0654